

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Výkonové polovodičové součástky -
přehled trhu**

**Power Semiconductor Devices - Market
Survey**

2013

Lukáš Gelnar

Zadání bakalářské práce

Student:

Lukáš Gelnar

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika

Téma:

Výkonové polovodičové součástky - přehled trhu
Power Semiconductor Devices - Market Survey

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te rozdělení a popis výkonových polovodičových prvků a jejich příslušenství.
2. Proved'te průzkum trhu výkonových polovodičových součástek.
3. Definujte význačné parametry vybraných výkonových polovodičových součástek a porovnejte je.

Seznam doporučené odborné literatury:

Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 1 - Přehled výkonových polovodičových součástek. Plzeň: ZČU 1994.

Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 6 - Projektování výkonových polovodičových měničů - vybrané stati. Plzeň: ZČU 2008

Wintrich, A.: Application Manual Power Semiconductors. Nuremberg : SEMIKRON International GmbH, 2011.

Černík, M.: Výkonové polovodičové spínače a výkonová elektronika. Liberec: TUL 2008.

Pavelka, J., Čeřovský, Z., Lettl, J.: Výkonová elektronika, Praha: skriptum ČVUT 2007.

Rashid, M. H.: Power Electronics Handbook. Pensacola, Florida 2001.

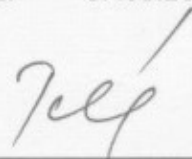
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Vaculík, Ph.D.**


Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Hájek

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 7.5.2013

Lukáš Gelnar

.....
Lukáš Gelnar

Poděkování:

Tato práce byla vypracována s podporou projektu Nové kreativní týmy v prioritách vědeckého bádání, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/30.0055 podpořeného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost a spolufinancovaného Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Především bych rád poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Vaculíkovi, Ph.D. za vedení a poskytnutí rad ohledně bakalářské práce, dále bych chtěl poděkovat i panu Ing. Jiřímu Hájkovi, Ph.D. z firmy ABB za specifikaci bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá přehledem trhu výkonových polovodičových součástek. V teoretické části jsou popsány statické i dynamické parametry, značky, charakteristiky a struktury součástek. Obsahuje popis nejpoužívanějších polovodičových součástek, jako je dioda, tyristor, GTO tyristor, IGCT tyristor, bipolární tranzistor, FET tranzistor, IGBT tranzistor. V neposlední řadě zde patří příslušenství pro tyto součástky, např. chladiče, řídicí a budicí jednotky.

Praktická část je zpracována formou rešerše. V této části jsou porovnávány elektrické parametry a možnosti jejich aplikace. Srovnávají se zde nejznámější výrobci polovodičových součástek, např. ABB, Westcode, Mitsubishi, Semikron a jiní. V závěru práce se nachází zhodnocení a trendy ve vývoji polovodičových prvků.

Klíčová slova

Výkonové součástky, GTO, IGBT, IGCT, dioda, tyristor, spínač, tranzistor

Abstract

This bachelor thesis provides an overview of the market power of semiconductor devices. The theoretical section provides a description of the static and dynamic parameters of semiconductor devices, which also includes schematic symbols, characteristics, and structural components. There is also a description of the following most used semiconductor devices: diode, thyristor, GTO thyristor, IGCT thyristor, bipolar transistor, FET transistor and IGBT transistor. Finally, there is an explanation about the accessories for these components, such as, cooling, control, and drive units.

The practical section is in the form of research. This section compares the electrical parameters and their possible applications. Also, the most famous manufacturers of semiconductor components are compared with one another, for example ABB, Westcode, Mitsubishi, and Semikron. In conclusion, there is an evaluation and trends in the development of semiconductor devices.

Key words

Power device, GTO, IGBT, IGCT, diode, thyristor, switch, transistor

Seznam použitých symbolů:

Veličina	Jednotka	Popis	Veličina	Jednotka	Popis
C_{GD}	F	Kapacita mezi Gate a Drain	R_F	Ω	Diferenciální propustný odpor
C_{GS}	F	Kapacita mezi Gate a Source	R_R	Ω	Diferenciální závěrný odpor
E_{OFF}	J	Energie ve vypnutém stavu	r_T	Ω	Diferenciální propustný odpor
E_{ON}	J	Energie v zapnutém stavu	R_{thHA}	K/W	Tepelný odpor mezi chladičem a okolím
E_z	J	Celková energie	$R_{thHAvent}$	K/W	Tepelný odpor R_{thHA} s ventilátorem
E_{zOFF}	J	Energie při vypínání	R_{thCH}	K/W	Tepelný odpor mezi pouzdrem a chladičem
E_{zON}	J	Energie při zapínání	R_{thJC}	K/W	Tepelný odpor mezi přechodem a pouzdrem
f	Hz	Frekvence	S_{lkrit}	$A \cdot s^{-1}$	Kritická strmost růstu propustního proudu
G_{OFF}	-	Vypínací zisk	t	s	Čas
h_{21E}	-	Proudový zesilovací činitel	t_d	s	Doba zpoždění
I^2t	A^2s	Mezní přetěžovací integrál	t_f	s	Doba poklesu
I_A	A	Proud tekoucí anodou	t_{fr}	s	Doba zotavení
I_B	A	Proud tekoucí do báze	t_{gd}	s	Doba zpoždění
I_C	A	Proud tekoucí do kolektoru	t_{gq}	s	Doba vypnutí
I_{Cmax}	A	Největší přípustný proud	t_{gr}	s	Doba nárůstu
I_{CMmax}	A	Největší přípustný proud v pulsním režimu	t_{gs}	s	Doba přesahu
I_D	A	Blokovací proud	t_{gt}	s	Doba zapnutí tyristoru
I_{D1}	A	Proud tekoucí do Drain	t_{OFF}	s	Doba vypnutí
I_E	A	Proud tekoucí z emitoru	t_{ON}	s	Doba zapnutí
I_F	A	Propustný proud	t_p	s	Doba nárůstu
I_{FG}	A	Zapínací proud tyristoru	t_q	s	Doba vypnutí tyristoru
I_{FM}	A	Maximální hodnota propustného proudu	t_{qf}	s	Doba poklesu
I_{FSM}	A	Maximální neopakovatelný závěrný proud	t_r	s	Doba nárůstu
I_G	A	Proud tekoucí do Gate	t_{rr}	s	Doba závěrného zotavení
I_{GD}	A	Proud protékající mezi Gate a Drain	t_s	s	Doba přesahu
I_{GT}	A	Minimální spínací proud	t_{TQ}	s	Doba proudového chvostu
I_H	A	Vratný proud	U	V	Napětí
I_L	A	Přidržený proud	U_{AK}	V	Napětí mezi anodou a katodou
I_R	A	Závěrný proud	U_{BE}	V	Napětí mezi bází a emitorem
I_{RG}	A	Vypínací proud tyristoru	U_{BO}	V	Spínací napětí
I_{RM}	A	Maximální hodnota závěrného proudu	U_{BR}	V	Průrazné napětí
I_{RR}	A	Zotavovací proud	U_{CB}	V	Napětí mezi kolektorem a bází
I_{rrM}	A	Špičkový zotavovací proud	U_{CC}	V	Napájecí napětí
I_T	A	Propustný proud	U_{CE}	V	Napětí mezi kolektorem a emitorem
I_{TQ}	A	Proudový chvost	U_{CEOmax}	V	Největší napětíová zatížitelnost
m	kg	Hmotnost	U_{CESat}	V	Saturační napětí
P	W	Ztrátový výkon	U_D	V	Blokovací napětí
P_{max}	W	Ztrátový výkon	U_{DS}	V	Napětí mezi Drain a Source
P_{Mmax}	W	Ztrátový výkon v pulzním režimu	U_F	V	Napětí v propustném směru
P_z	W	Celkový ztrátový výkon	U_{FM}	V	Maximální hodnota propustného napětí
Q_{IT}	C	Náboj zotavení	U_{FRM}	V	Maximální napětí při zapnutí
R_{DS}	Ω	Odpor mezi Drain a Source	U_G	V	Napětí generátoru
R_{DSON}	Ω	Odpor v sepnutém stavu	U_{GE}	V	Napětí mezi Gate a Emitorem

$U_{GE(th)}$	V	Prahové napětí	U_{TO}	V	Propustné prahové napětí
U_{GS}	V	Napětí mezi Gate a Source	β	-	Vnucené proudové zesílení
U_R	V	Napětí v závěrném směru	ϑ_A	°C	Teplota okolí
U_{RM}	V	Maximální hodnota závěrného napětí	ϑ_C	°C	Teplota pouzdra
U_{RRM}	V	Maximální opakovatelné závěrné napětí	ϑ_H	°C	Teplota chladiče
U_{RSM}	V	Maximální neopakovatelné závěrné napětí	ϑ_J	°C	Teplota přechodu
U_{RWM}	V	Maximální pracovní závěrné napětí	τ	s	Časová konstanta
U_T	V	Propustné napětí			

Seznam použitých zkratk:

Zkratka	Popis	Zkratka	Popis
A	Anoda	GTO	Gate Turn Off
AC	Střídavé napětí	IG FET	Insulated Gate Field Effect Transistor
B	Báze	IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
BJT	Bipolar Junction Transistor	IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor
C	Kondenzátor	K	Katoda
C	Kolektor	L	Cívka
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	LED	Light Emitting Diode- dioda emitující světlo
CRT	Cathode ray tube	MOSFET	Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor
D	Dioda	R	Rezistor
D	Drain	S	Source
DC	Stejnoseměrné napětí	SCR	Silicon Controlled Rectifier
E	Emitter	SE	Společný emitter
FET	Field Effect Transistor	SiC	Karbid křemíku
G	Gate	TTL	Tranzistorově-tranzistorová logika
GCT	Gate Commutated Thyristor	VA	Voltampérová
GND	Zemnění	VPS	Výkonové polovodičové součástky

Obsah

1. ÚVOD	9
2. VÝKONOVÉ POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY	10
2.1 POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY S VNĚJŠÍ KOMUTACÍ	12
2.1.1 Dioda.....	12
2.1.2 Tyristor.....	15
2.2 POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY S VLASTNÍ KOMUTACÍ	19
2.2.1 GTO tyristor.....	19
2.2.2 IGCT tyristor.....	22
2.2.3 Bipolární tranzistor	23
2.2.4 MOSFET tranzistor.....	27
2.2.5 IGBT tranzistor	30
3. MODERNÍ TRENDY VE VPS	32
3.1 SOUČÁSTKY SiC	32
3.2 TRANZISTORY COOLMOS.....	32
3.3 TECHNOLOGIE TRENCHFET	32
4. PŘÍSLUŠENSTVÍ	33
4.1 CHLAZENÍ POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK	33
4.2 BUDICÍ OBVODY – MOSFET, IGBT	35
5. VÝROBCI VPS.....	38
6. POROVNÁNÍ VPS.....	39
6.1 DIODY	39
6.2 TYRISTORY	41
6.3 MOSFET TRANZISTORY	43
6.4 IGBT TRANZISTORY	45
6.5 CHLADIČE.....	47
7. ZÁVĚR.....	49
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	50

1. Úvod

První elektrotechnická revoluce začala v roce 1948 s vynálezem křemíkového tranzistoru v Bellových telefonních laboratořích. Z dnešních pokročilých elektronických technologií je patrné, že vynalézavostí a moderní mikroelektronikou byla vyvinutá v průběhu let z polovodičového křemíku. Druhá elektronická revoluce začínala vývojem tyristoru firmou General Electric Company v roce 1958. To byl začátek nové éry výkonové elektroniky. Od té doby bylo uvedeno na trh mnoho různých druhů výkonových polovodičů.

V osmdesátých letech minulého století přišly na trh vypínatelné tyristory GTO, v devadesátých letech tranzistory IGBT. V novém tisíciletí nastal rozmach technologií na základě nových materiálů SiC (karbid křemíků).

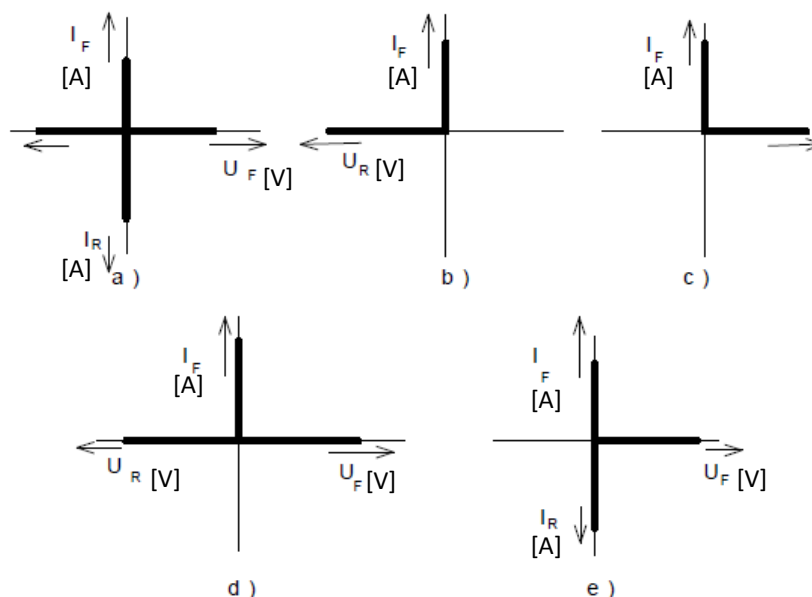
Postupem času stále modernějšími technologickými výrobními procesy dochází ke zmenšování rozměru součástek a k úsporám elektrické energie, současně se zvyšuje hustota polovodičových prvků. Platí zde empirické pravidlo – Moorův zákon, které vyslovil Gordon Moore v roce 1965 a které zní: *„Počet tranzistorů, které mohou být umístěny na čip integrovaného obvodu se zhruba každých 18 měsíců zdvojnásobí.“*

V dnešní době MOSFET tranzistory, IGCT tyristory a IGBT tranzistory prezentují moderní spínací prvky. Rozsah aplikace se stále rozšiřuje jak v průmyslu tak i doma v oblastech jako je napájení k řízení pohybu, tovární automatizaci, dopravě, akumulace energie, megawattové průmyslové pohony, přenos elektrická energie.

2. Výkonové polovodičové součástky

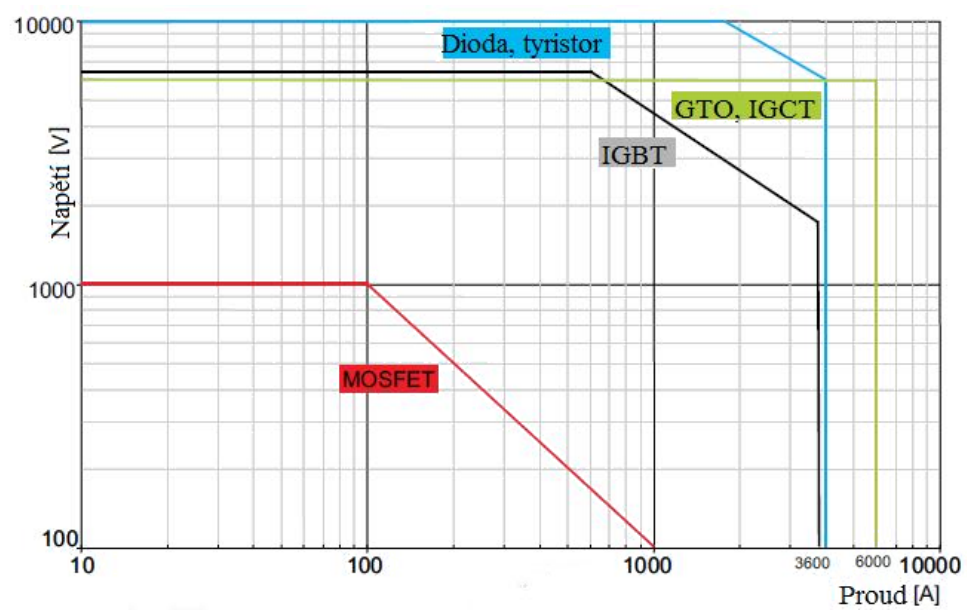
Výkonové polovodičové součástky fungují na principu jejich spínání. Spínač může při své činnosti přecházet z propustného směru do směru závěrného a naopak. Tento přechod může nastat v sepnutém i rozepnutém stavu. Na obr. 2.1 jsou zobrazeny typy charakteristik.

- a) ideální prvek
- b) dioda
- c) tranzistorové spínače
- d) tyristor, GTO, IGCT
- e) unipolární spínače [1]



Obr. 2.1 Typy charakteristik ideálních spínačů[5]

Velikosti mezních parametrů se postupem času zvyšují. Souvisí to s vývojem nových technologií polovodičových materiálů. Znázornění jednotlivých prvků je na obr. 2.2. Jsou zde zakresleny mezní hodnoty – maximální proud a napětí, kterých mohou prvky dosahovat. [2]



Obr. 2.2 Mezní hodnoty spínacích prvků[2]

2.1 Polovodičové součástky s vnější komutací

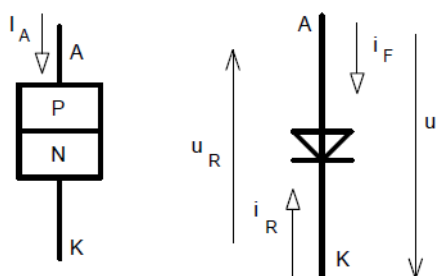
2.1.1 Dioda

Polovodičová dioda je součástka, která je tvořena dvěma vrstvami a jedním PN přechodem. Do obvodu je zapojena pomocí dvou elektrod:

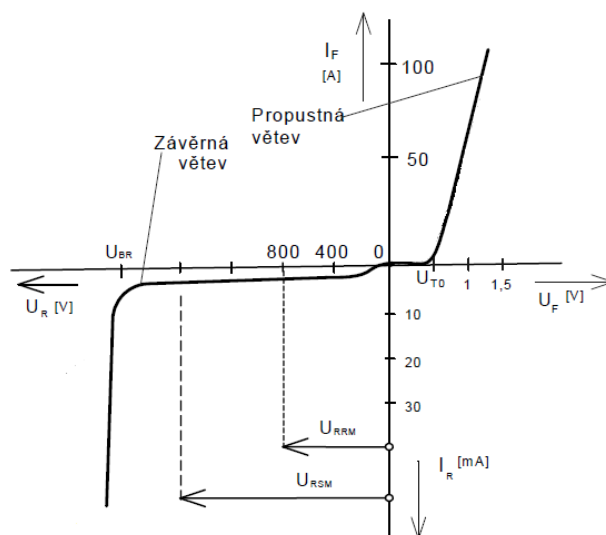
Anoda (A) – elektroda spojena s materiálem typu P

Katoda (K) – elektroda spojena s materiálem typu N

Název dioda vznikl spojením dvou slov: **DI**, což znamená dva, druhá část názvu **ODA** vznikla ze slova **elektroda**. Tedy dvoelektrodová součástka. Je-li napětí od anody ke katodě polováno kladně, je dioda v propustném směru. V opačném případě je napětí v závěrném směru. V sepnutém stavu prochází diodou proud i_F a je na ní propustné napětí u_F . V závěrném stavu je na diodě závěrné napětí u_R a protéká jí závěrný proud i_R . Zobrazeno na obr. 2.3 vpravo. [4][5]



Obr. 2.3 Struktura a schematická značka diody[5]



Obr. 2.4 VA charakteristika diody[5]

Důležitými parametry v propustném směru jsou:

- propustné prahové napětí U_{T0}
- diferenciální propustný odpor r_F – definovaný v určitém pracovním bodu charakteristiky

$$r_F = \frac{dU_F}{dI_F} \quad [\Omega; V, A] \quad (2.1)$$

- maximální opakovatelná hodnota propustného proudu I_{FM}
- maximální hodnota propustného napětí U_{FM} odpovídá I_{FM}
- maximální neopakovatelná hodnota propustného proudu I_{FSM}

Důležitými parametry v závěrném směru jsou:

- diferenciální závěrný odpor r_R

$$r_R = \frac{dU_R}{dI_R} [\Omega; V, A] \quad (2.2)$$

- závěrné průrazné napětí $U_{(BR)}$ – po překročení se výrazně zmenší r_R
- maximální neopakovatelná hodnota závěrného napětí U_{RSM}
- maximální opakovatelná hodnota závěrného napětí U_{RRM}
- maximální pracovní závěrné napětí U_{RWM} [6][7]

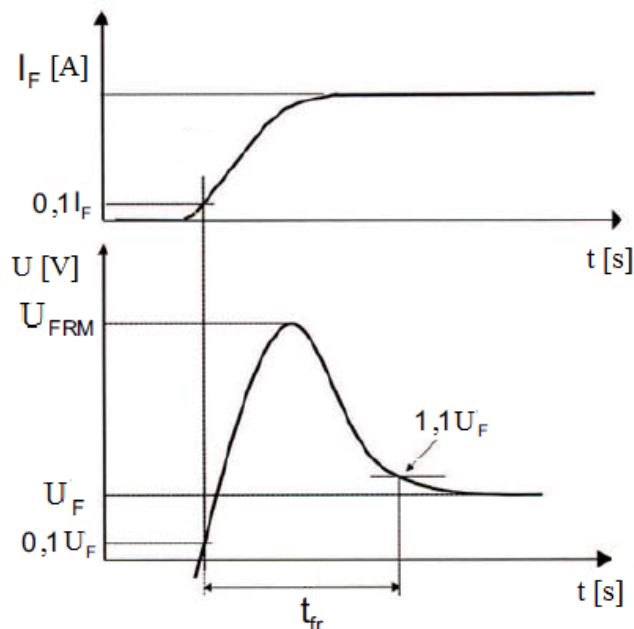
$$U_{RWM} = (0,33 \text{ až } 0,5) \cdot U_{RRM} [V; V] \quad (2.3)$$

Dynamické parametry:

Dynamické parametry popisují chování při rychlých přechodech ze zapnutého do vypnutého stavu a opačně.

Přechod ze závěrného do propustného stavu:

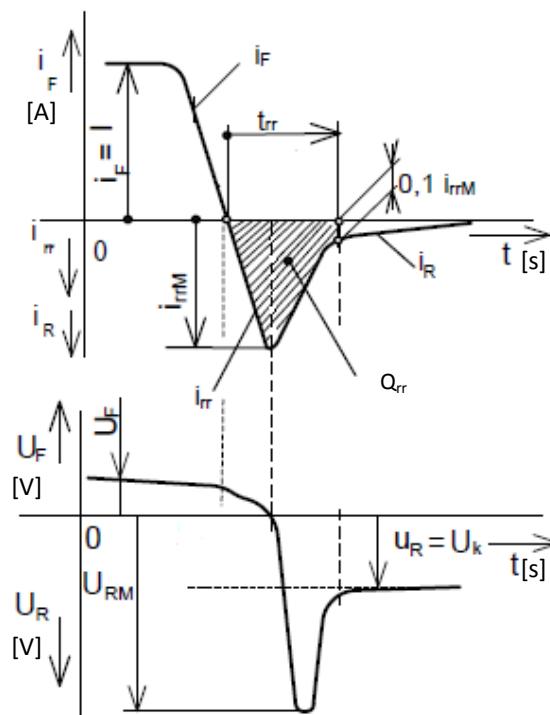
Když dioda spíná do vodivého stavu, napětí se bude z počátku zvyšovat do maximálního spínacího napětí U_{FRM} . Doba zotavení t_{tr} diody je v rozsahu 100ns. Tato doba se počítá od 10 % sepnutí U_F (I_F) po pokles na 110 % U_F .



Obr. 2.5 Zapínání diody[2]

Přechod z propustného do závěrného stavu:

Tento přechod má prvořadý význam při vypnutí (komutaci) diody.



Obr. 2.6 Komutace diody[7]

Při poklesu propustného proudu i_F k nule proud nezaniká, ale přechází do zpětného směru. Za krátkou dobu se vodivost ve zpětném směru ztratí a závěrný proud prudce klesá na statickou hodnotu. Proud v době závěrného zotavení t_{rr} se nazývá zotavovací proud i_{rr} . S tímto proudem souvisí náboj zotavení Q_{rr} , který určuje maximální proud zotavení I_{rrM} . [2][7]

$$Q_{rr} = \int_0^{t_{rr}} i_{rr} dt \quad [C; A, s] \quad (2.4)$$

V dnešní době se pohybuje mezní hranice proudu kolem 10kA, napěťová hranice kolem 5kV. Doba spínání nejrychlejších diod je do 20ns, zatímco pomalejší diody vyžadují 100μs a více. Výrobou se zabývají např. ABB, Mitsubishi a Semikron.

2.1.2 Tyristor

Tyristor je polovodičová součástka tvořena čtyřmi vrstvami a třemi přechody PN. Do obvodu se zapojuje pomocí 3 elektrod:

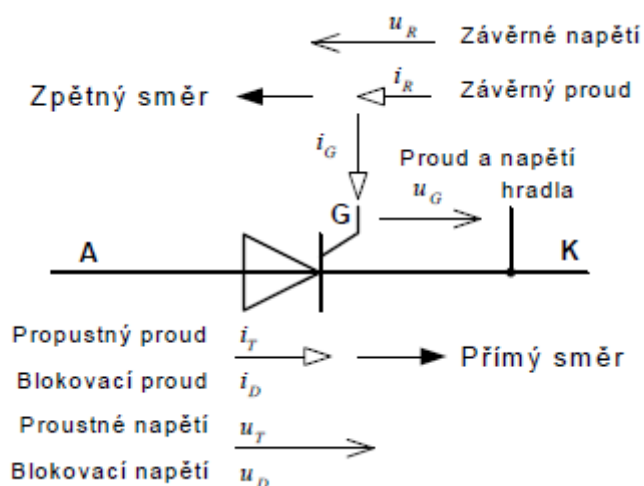
Anoda (A)

Katoda (K)

Gate (G) – řídicí elektroda

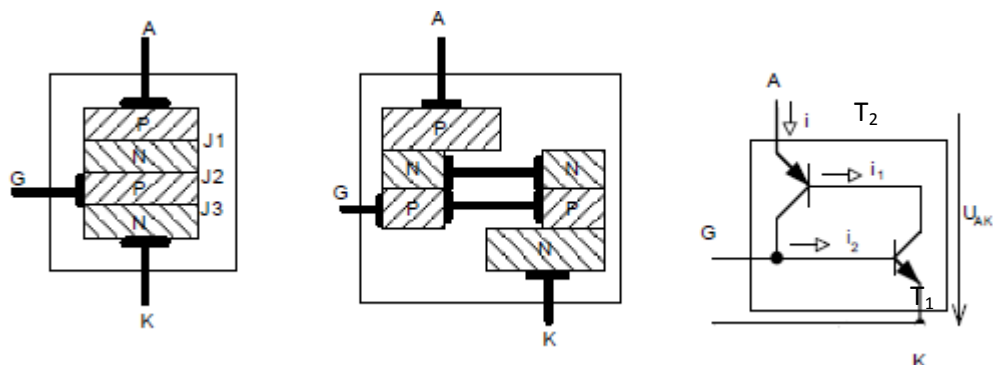
Tyristor má též označení SCR (Silicon Controlled Rectifier – křemíkový řízený usměrňovač)

Pokud je na tyristor přiveden signál do řídicí elektrody G a je v propustném směru, pak tyristor přejde do sepnutého stavu. Jestliže je tyristor stále v propustném směru, zůstává sepnut i přes přerušení řídicího signálu. Na obr. 2.7 je znázorněna schematická značka tyristoru a orientace veličin.



Obr. 2.7 Orientace veličin tyristoru[7]

Funkce tyristoru se dá vysvětlit pomocí zapojení dvou tranzistorů. Princip je na obr. 2.8. Při přivedení proudu I_G do řídicí elektrody G – báze tranzistoru T_1 , začne protékat tranzistorem T_1 proud, který teče do tranzistoru T_2 . Ten se otevře a proud I_c teče do báze tranzistoru T_1 . V této chvíli je možno přerušit proud I_G , protože oba tranzistory zůstanou sepnuté. [3][7]



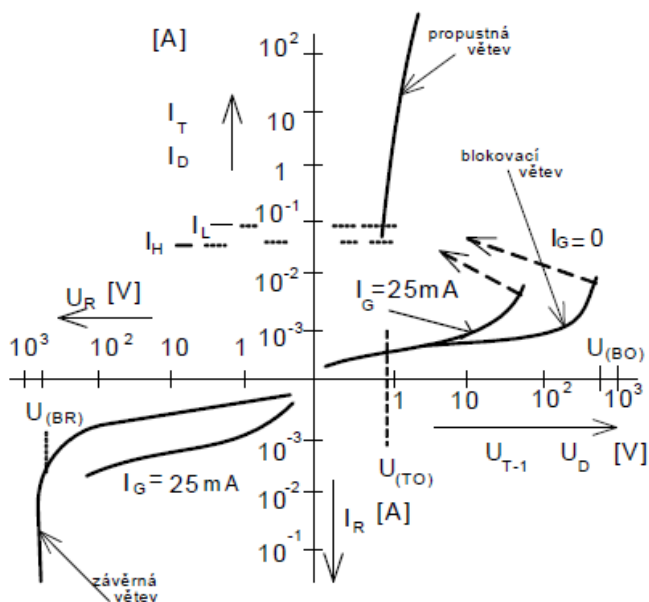
Obr. 2.8 Struktura tyristoru a odvozené zapojení[5]

Tyristorová charakteristika se skládá ze tří typů:

Blokovací charakteristika – Popisuje závislost vypnutého propustně polovaného tyristoru. Při překročení spínacího napětí $U_{(BO)}$ se tyristor sepne.

Závěrná charakteristika – Popisuje závislost vypnutého závěrně polovaného tyristoru. Při překročení průrazného napětí $U_{(BR)}$ dojde ke zničení tyristoru.

Propustná charakteristika – Popisuje závislost sepnutého tyristoru. Definuje se prahovým napětím $U_{(TO)}$ a diferenciálním propustným odporem r_T . [5]



Obr. 2.9 Výstupní VA charakteristika tyristoru[7]

Dynamické parametry

Zapínání:

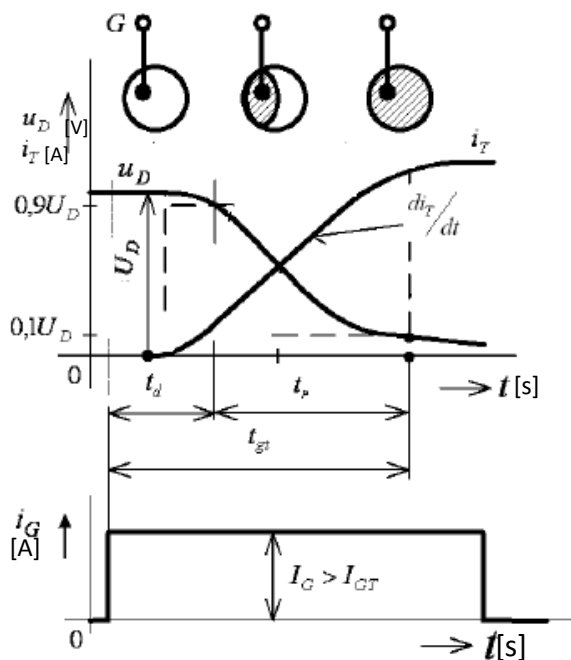
Tyristor je možno sepnout zvyšujícím napětím mezi A a K. Jakmile se bude napětí $U_{AK} = U_{(BO)}$, dojde k lavinovému průrazu a k sepnutí. Tento způsob se těžko ovládá, proto se nepoužívá. Pro spínání se uplatňuje proudový signál přivedený do řídicí elektrody G.

Přivedením spínacího impulsu nenastane sepnutí okamžitě. Anodový proud nejdříve protéká přes úzký kanál, který se postupně od toho místa šíří do celého průřezu tyristoru. Zapínací doba je t_{gt} je definována součtem doby zpoždění t_d a doby poklesu t_p . Doba zpoždění je určena od přivedení proudu na řídicí elektrodu, až na 90% blokovacího napětí u_D . Doba poklesu t_p určuje rozmezí od 90% u_D po 10% u_D . Při velké strmosti nárůstu propustného proudu by mohlo dojít k přehřátí přechodu a ke zničení tyristoru. Proto je strmost růstu i_T omezena na kritickou strmost růstu propustného proudu S_{Ikrit} . [5]

$$S_{Ikrit} = \left(\frac{di_T}{dt} \right)_{krit} [A \cdot s^{-1}; A, s] \quad (2.5)$$

Pro úspěšné sepnutí tyristoru musí být splněny podmínky:

- na tyristoru je blokovací napětí
- na G je přiveden dostatečně velký řídicí impuls
- řídicí impuls trvá déle, než je doba nárůstu proudu tyristorem
- strmost nárůstu proudu i_T musí být menší než $\left(\frac{di_T}{dt} \right)_{krit}$ [6]



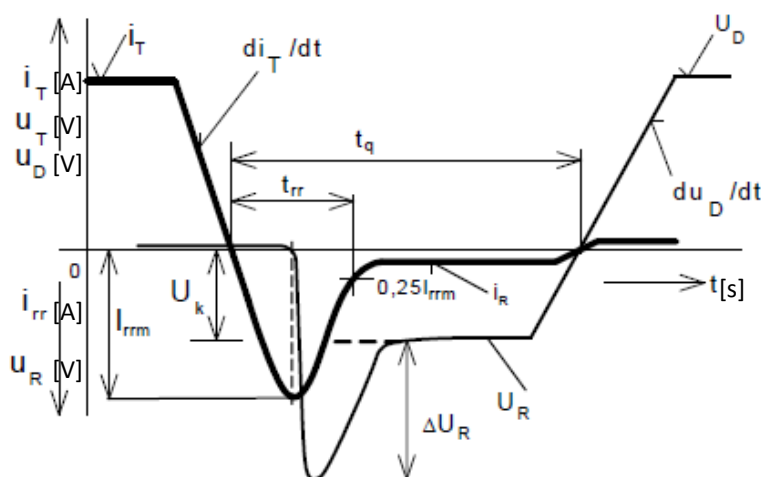
Obr. 2.10 Zapínání tyristoru[5]

Vypínání

V průběhu vypínání se odčerpávají nadbyteční nositele vodivosti. Při pomalých dějích se stihnou volné náboje odstranit rekombinací a tím se tyristor vypne při poklesu pod hodnotu proudu I_H . Proces, při kterém dochází k obnovení blokovacího napětí, je popsán vypínací dobou t_q . Vypínací doba charakterizuje dobu mezi průchodem propustného proudu nulou a dobou možného přiložení blokovacího napětí, aniž by se tyristor sepnul. Je zde i zotavovací doba t_{rr} jako u diody, kde dochází k odčerpání náboje.[7]

Pro úspěšné vypnutí tyristoru musí být splněny podmínky:

- proud i_T musí klesnout k nule
- na tyristoru musí být závěrné napětí po dobu t_q
- kritická strmota blokovacího napětí nesmí přesáhnout $\left(\frac{du_D}{dt}\right)_{krit}$ [6]



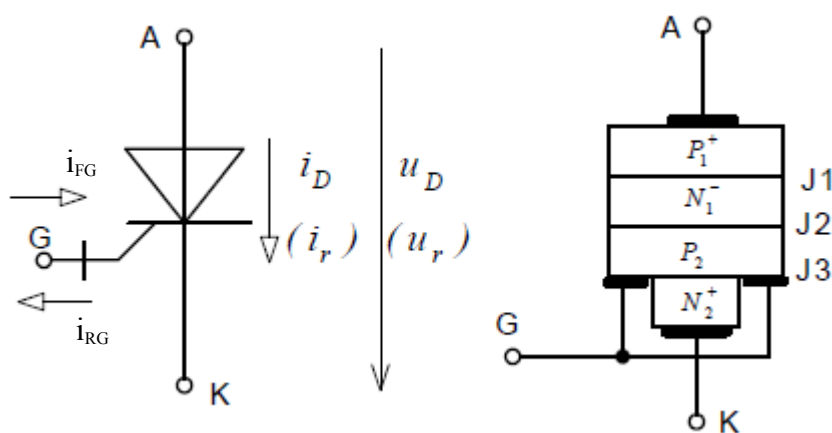
Obr. 2.11 Vypínání tyristoru[7]

Dnešní prvky dosahují maximální hranice proudu kolem 7000A. Napěťová hranice je kolem 6kV. Tyto parametry jsou shodné s usměrňovací diodou. Doba spínání tyristoru dosahuje od 1ms do 200ms. Výrobou tyristorů se zabývají firmy ABB, Westcode a další.

2.2 Polovodičové součástky s vlastní komutací

2.2.1 GTO tyristor

Je to starší typ vypínacího tyristoru, používá se od 80. let a dnes je na ústupu. Postupně je nahrazován novějšími spínacími součástkami jako je IGBT tranzistor a IGCT tyristor. Tento GTO tyristor umožňuje oproti předchozímu typu tyristoru vypnutí pomocí řídicího signálu. Signál má opačnou polaritu proudu než při zapínání tyristoru a je výrazně větší. Zkratka GTO tyristor vznikla z označení **G**ate **T**urn **O**ff Thyristor (hradlem vypínatelný tyristor).

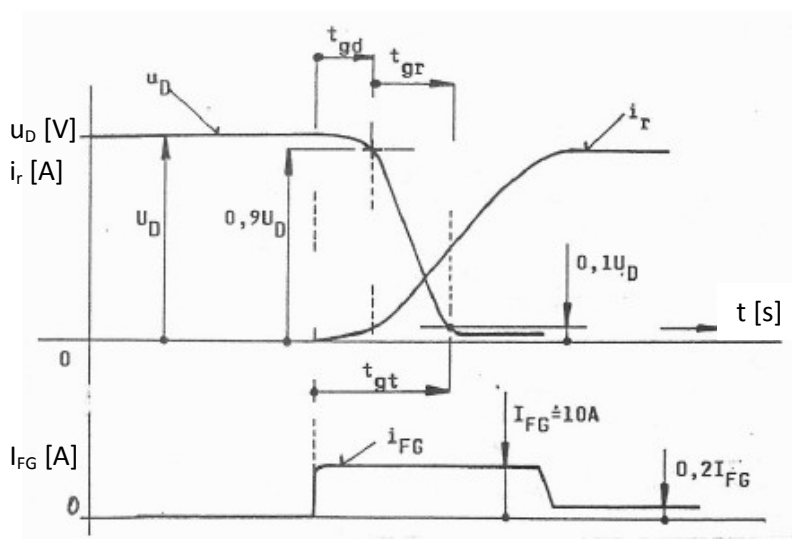


Obr. 2.12 Schematická značka a struktura tyristoru[5]

GTO tyristor má mnohem složitější členění vrstev tvořící přechod J3. Řídicí elektroda je rozprostřena do celého průřezu tyristoru. To umožní vypnout tyristor přivedením impulsu i_{RG} na hradlo G.

Vyrábějí se různé typy tyristorů podle její struktury: Dělí se na **symetrické**, kde jsou závěrné a blokovací charakteristiky stejné. Dále na **polosymetrické**, u kterého blokovací napětí dosahuje 0,5–0,8 napětí závěrného a **asymetrické**, které neudrží závěrné napětí.

Zapínání se provádí impulsem i_{FG} po dobu t_{gt} , tato doba je ve srovnání s klasickým tyristorem větší. Délka spínaného rozhraní mezi G a K se pohybuje u klasického tyristoru v jednotkách cm a amplituda řídicího impulsu kolem 1 až 2A. V případě GTO se délka spínaného rozhraní pohybuje v jednotkách m. Pro zajištění stejné hustoty řídicího signálu jako u klasického tyristoru musí být zapínací proud I_{FG} stovky A, v praxi se volí kolem 10A. Přivedením řídicího impulsu i_{FG} klesá blokovací napětí u_D a současně se zvyšuje proud i_r . Aby nedocházelo k přerušení propustného proudu, je na řídicí elektrodu po dobu sepnutí tranzistoru přiváděn proud velikosti $0,2 \cdot I_{FG}$. (obr. 2.13)



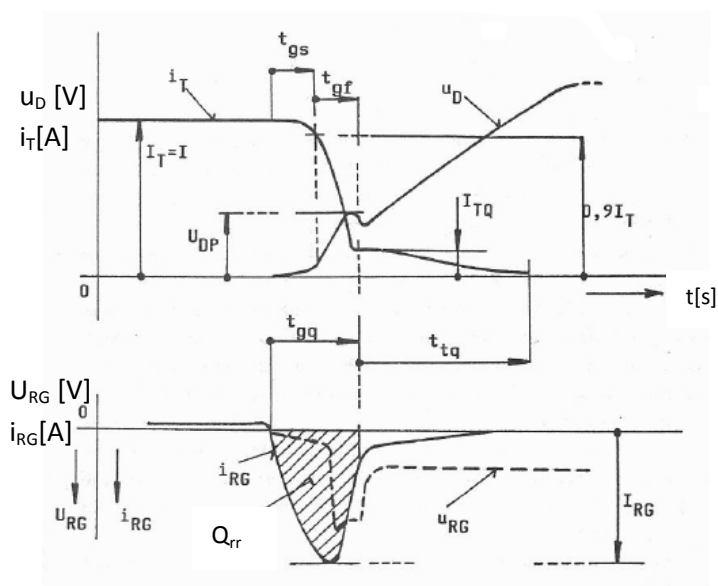
Obr. 2.13 Zapínání tyristoru[7]

Vypínání probíhá nárůstem proudu i_{RG} . Přivedením tohoto proudu na řídicí elektrodu, po době t_{gs} začíná propustný proud i_T pomalu klesat. Pak následuje rychlejší pokles v době t_{gf} . Celková doba vypínání je tedy daná: (obr. 2.14)

$$t_{gq} = t_{gs} + t_{gf} \quad [s; s, s] \quad (2.6)$$

V průběhu vypínání je nutné odčerpat velikost náboje Q_{rr} z vrstvy mezi J2 a J3. Velikost vypínacího proudu I_T je závislé na velikosti I_{RG} . Důležitým parametrem, který tuto závislost vystihuje je vypínací zisk G_{OFF} . Vypínací zisk se pohybuje v rozmezí 3 až 4. [5][6][7]

$$G_{OFF} = \frac{I_T}{I_{RG}} \quad [-; A, A] \quad (2.7)$$



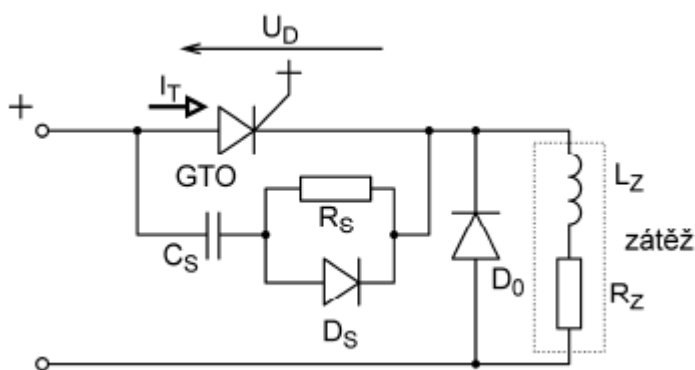
Obr. 2.14 Vypínání tyristoru[7]

GTO tyristoru se musí omezit strmota nárůstu blokovacího napětí, aby nedošlo k průrazu a tím k nežádoucímu sepnutí. Z toho důvodu se zapojuje k tyristoru odlehčovací obvod tzv. snubber, který upraví časový průběh napětí a proudu.

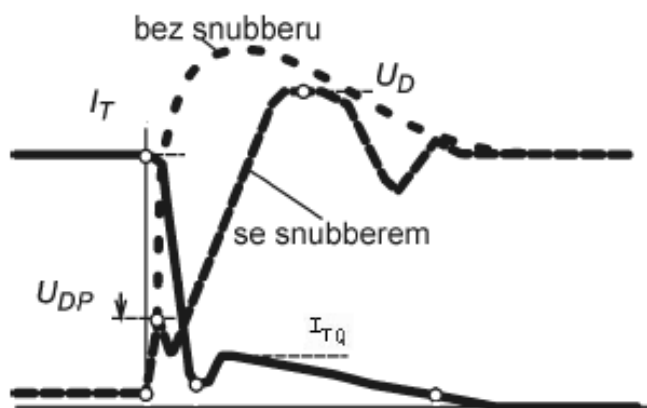
Funkce odlehčovacího obvodu:

Ve vypnutém stavu tyristoru je na kondenzátoru C_S napětí sítě. Při zapnutí tyristoru se kondenzátor C_S vybíjí přes rezistor R_S . Výsledkem je součet úbytku propustného napětí a vybíjecí exponenciály s časovou konstantou $\tau = R_S C_S$ [s; Ω , F]. (2.8)

Při vypnutí tyristoru vlivem parazitních indukčností odlehčovacího obvodu a špičkového napětí propustného zotavení diody D_S strmě vzroste napětí U_{DP} . Proud je odváděn přes diodu D_S a kondenzátor C_S , čím se sníží nárůst napětí na GTO tyristoru. [3]



Obr. 2.15 Schéma zapojení tyristoru s odlehčovacím obvodem[3]

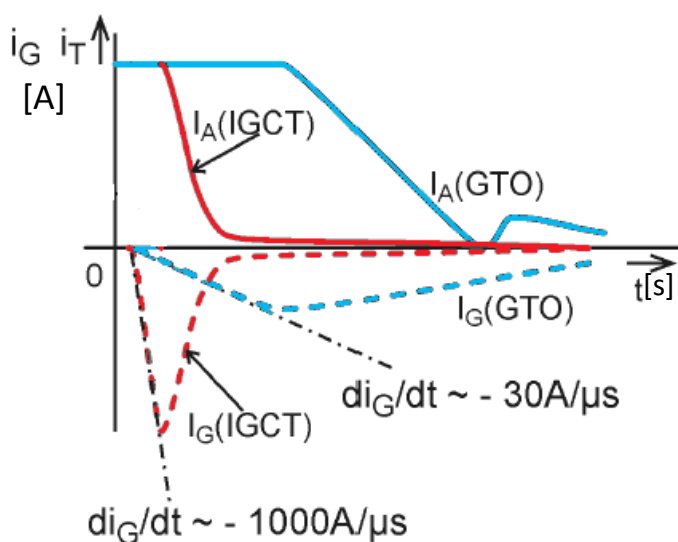


Obr. 2.16 Časový průběh vypínání se snubberem a bez snubberu[3]

V současné době prvky dosahují hranice proudu kolem 6000A. Napěťová hranice se pohybuje kolem 6kV. Tyto parametry jsou shodné s usměrňovací diodou. Spínací frekvence dosahuje 300 Hz. Úbytek tyristoru činí 3V. [6]

2.2.2 IGCT tyristor

Název IGCT je označení pro **I**ntegrated **G**ate **C**ommutated **T**hyristor. Jedná se o velmi rychle vypínatelný GTO tyristor. Řídicí jednotka je integrovaná v blízkosti čipu tyristoru, tím se zvýšila strmost nárůstu řídicího proudu až o 2 řády. Díky této konstrukci nevzniká indukce (obr. 2.17). Řídicím pulzem je tak možno dosáhnout kratšího času (méně jak 1 μ s) a velikosti proudu anody. Odlehčovací obvod zde není nutný, ani účinný z důvodu vysoké strmosti poklesu anodového proudu a parazitním indukčností. Tudíž se může IGCT tyristor řadit do paralelních i sériových zapojení. Součástka s integrovanou řídicí jednotkou se označuje IGCT, součástka bez řídicí jednotky se nazývá GCT. [3][6]



Obr. 2.17 Srovnání časového průběhu GTO a IGCT[3]

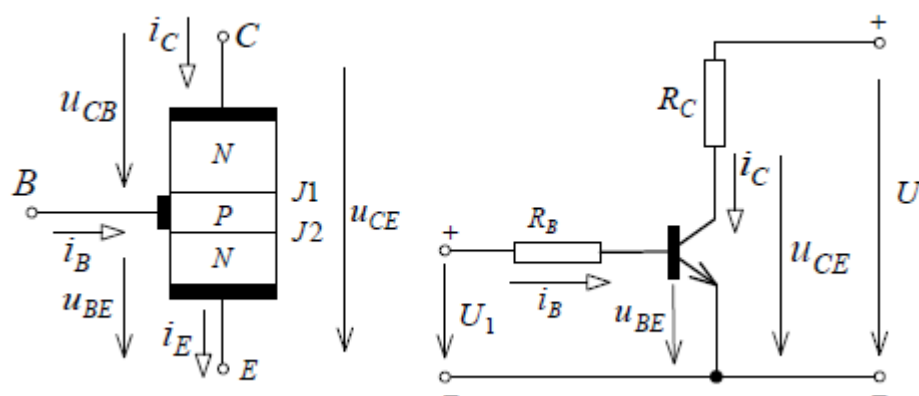
Výhody IGCT oproti GTO tyristorům:

- Není omezená strmost nárůstu blokovacího napětí $\frac{dU_D}{dt}$
- Není potřeba odlehčovacích sítí
- Výrazně se sníží vypínací ztráty
- Zkrácení vypínací doby [5]

IGCT má jedinou konstrukční nevýhodu – sníženou odolnost vůči chvění a mechanickým otřesům. IGCT má stejné napěťové i proudové meze jako GTO tyristor, jen se zvýšila jeho spínací frekvence na 1 kHz.

2.2.3 Bipolární tranzistor

Bipolární tranzistor je polovodičová součástka tvořena třemi vrstvami v uspořádání NPN a PNP se dvěma přechody. Také se používá anglická zkratka BJT (**B**ipolar **J**unction **T**ransistor). Ve výkonové elektronice se výhradně používá tranzistor NPN v zapojení se společným emitorem (SE) z důvodu největšího zesílení. Výstupní elektrody tranzistoru se skládají z kolektoru **C** (collector), emitoru **E** (emitter) a vstupní báze **B** (base). Přivedením proudu do báze I_B se řídí proud tekoucí do kolektoru I_C . [3][6]

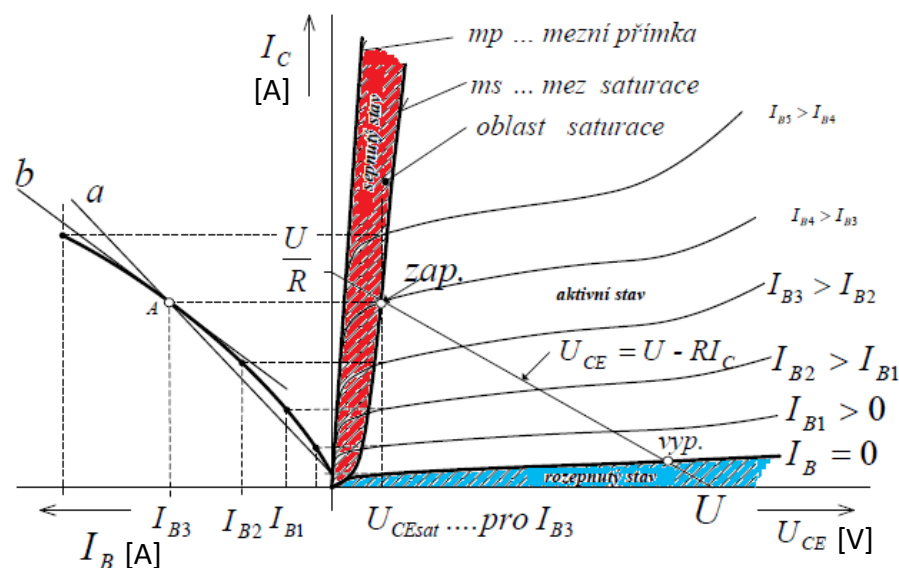


Obr. 2.18 Struktura a zapojení tranzistoru se SE[5]

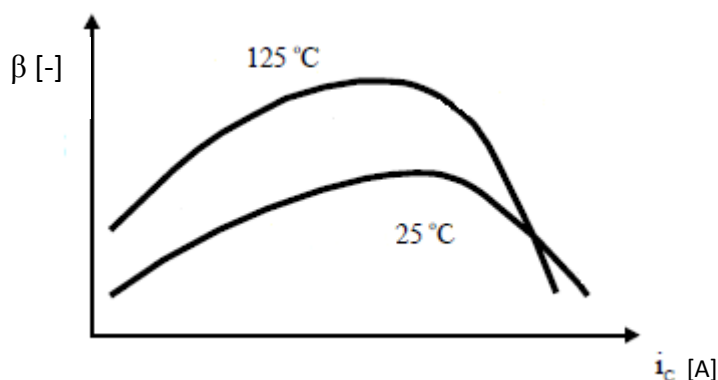
Je-li $I_B = 0$, tranzistor je v rozepnutém stavu, neboli pracovní bod leží v závěrné oblasti. Na obr. 2.19 znázorněno modře. Tranzistorem prochází zbytkový proud, který je zanedbatelně malý. Pohybuje-li se pracovní bod v rozsahu mezi mezní přímkou a přímkou saturace je pracovní bod v oblasti saturace a tudíž je tranzistor v sepnutém stavu. V režimu spínání tranzistoru se aktivní oblast nevyužívá, jen v přechodových dějích při zapínání a vypínání tranzistoru. Důležitým parametrem spínacích tranzistorů je saturační napětí U_{CEsat} , protože udává ztrátový výkon v sepnutém stavu. Velikost zesílení je dáno statickým proudovým zesilovacím činitelem h_{21E} . Tento činitel je důležitější pro spínací aplikace. Na obr. 2.19 je znázorněn přímkou „a“ a je dán poměrem proudu kolektoru I_C k proudu báze I_B . Velikost proudu kolektoru I_C je závislá na velikosti zátěže, používá se v oblasti saturace termín vnucené proudové zesílení β .

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} [-; A, A] \quad (2.9)$$

Průběh proudového zesilovacího činitele je závislý na teplotě pouzdra a je znázorněn na obr. 2.20.



Obr. 2.19 VA charakteristika bipolárního tranzistoru[7]



Obr. 2.20 Průběh proudového zesilovacího činitele

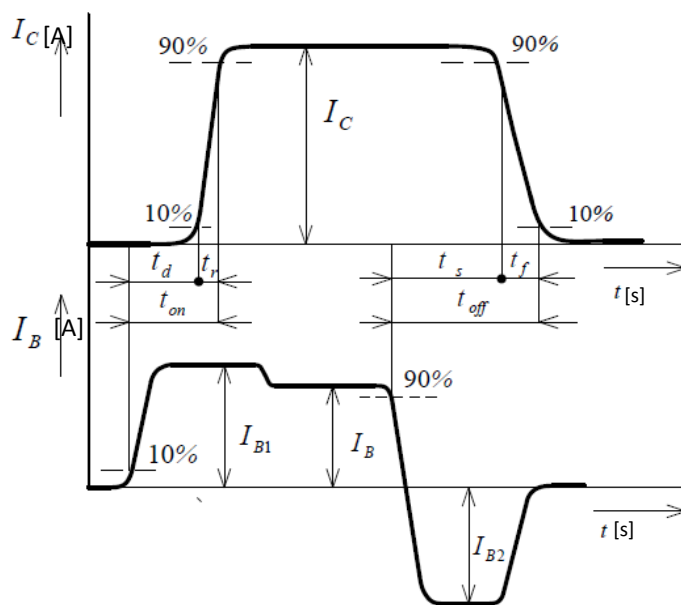
Dynamické parametry

Při zapínání dochází k době zpoždění t_d , je to doba od přivedení řídicího signálu $0,1 \cdot I_B$ po 10% nárůst proudu I_C . Tato doba zpoždění t_d společně s dobou nárůstu t_r udává dobu zapnutí t_{ON} . Pro rychlejší zapnutí tranzistoru je možné přivést větší bázevý proud I_{B1} a to jen do doby sepnutí tranzistoru. V sepnutém stavu se proud musí snížit, aby proud I_B nezpůsobil přesycení a nevyšla se tím doba vypnutí t_{OFF} .

$$t_{ON} = t_d + t_r \text{ [s; s, s]} \quad (2.10)$$

Doba vypínání t_{OFF} je charakterizována dobou přesahu t_s a dobou poklesu t_f . Zkrácení doby vypnutí t_{OFF} se docílí přivedením záporného proudu I_{B2} do báze. (obr. 2.21)

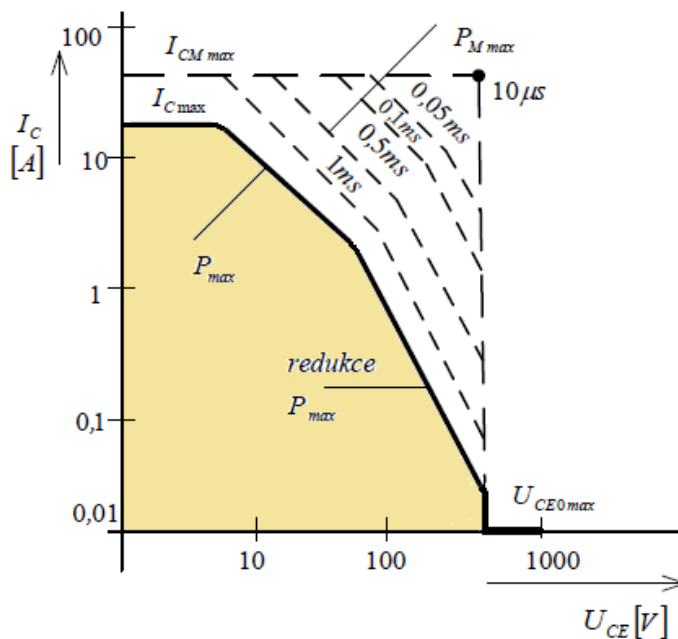
$$t_{OFF} = t_s + t_f \text{ [s; s, s]} \quad (2.11)$$



Obr. 2.21 Průběhy zapínání a vypínání odporové zátěže[5]

Zatížitelnost tranzistoru:

Důležitým parametrem pro výběr tranzistoru je dovolená pracovní oblast. Charakterizuje mezní hodnoty kolektorového proudu I_C v závislosti na napětí U_{CE} . Pracovní bod nesmí překročit tyto meze. Plnou čarou je znázorněn režim, kdy tranzistor může pracovat trvale. V případě, kdy tranzistor bude pracovat v pulzním režimu, může překročit dovolenou pracovní oblast. Čím bude kratší doba sepnutí, tím vznikne rozsáhlejší pracovní oblast.

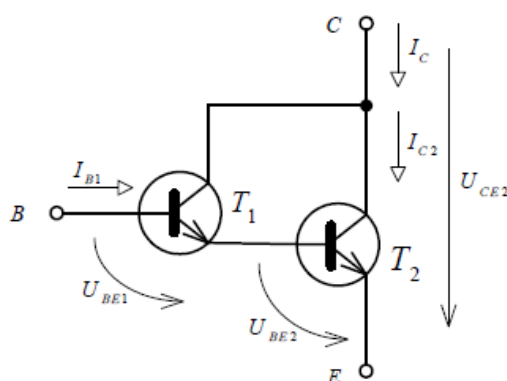


Obr. 2.22 Dovolená pracovní oblast[5]

V trvalém režimu se udává maximální přípustný trvalý proud $I_{C \max}$ a v pulzním režimu špičková hodnota proudu $I_{CM \max}$. Největší přípustnou hodnotu $U_{CEO \max}$ udává napěťová zatížitelnost, je stejná pro režim trvalý i režim pulzní.

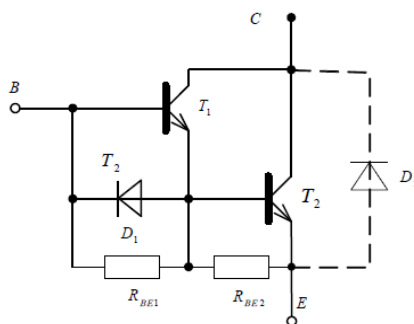
Proudové zesílení tranzistoru je nízké $h_{21E} = 5$ až 10, což je velká nevýhoda, protože se tranzistor musí budit velkým proudem I_B . Proto se zavedlo Darlingtonovo zapojení tranzistoru, kde je v jednom pouzdře zapojeno více tranzistorů. Tranzistor T_1 pracuje ve funkci budiče, na jeho výstup je zapojena báze tranzistoru T_2 . Výsledná velikost proudového zesílení je pak dána:

$$h_{21E} = h_{21E1} + h_{21E2} + h_{21E1} \cdot h_{21E2} \quad [-; -, -, -, -] \quad (2.12)$$



Obr. 2.23 Darlingtonovo zapojení

Pro zlepšení vlastností – tepelné stability a dynamického chování se zapojují do bezpotenciálových modulů kromě tranzistorů také odpory a dioda D_1 , která umožní přivedení záporného proudu na tranzistor T_2 a tím rychlejší vypnutí tranzistoru. Dioda D_2 chrání tranzistor před přepólováním napětí U_{CE} a zároveň se uplatňuje jako zpětná dioda. [5][7]



Obr. 2.24 Reálné zapojení v bezpotenciálním modulu[5]

V současné době jsou tranzistory vyráběny pro napětí $U_{CE} = 1000V$, proudu $I_C = 400A$ a zesilovacího proudového činitele $h_{21E} = 50$ až 100. Saturační napětí činí $U_{CE \text{ SAT}}$ do 2V.[6]

2.2.4 MOSFET tranzistor

Tranzistor MOSFET patří do skupiny unipolárních součástek, pro které se používá název FET (Field Effect Transistor – tranzistor řízený elektrickým polem). Zkratka MOSFET vznikla z anglického názvu Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor. Tento typ tranzistoru využívá řídicí elektrodu izolovanou od polovodiče, také se nazývá IG FET (Insulated Gate FET – FET s izolovaným hradlem). Je zapojen do obvodu pomocí tří elektrod:

D (C) – první vývod kanálu (DRAIN)

S (E) – druhý vývod kanálu (SOURCE)

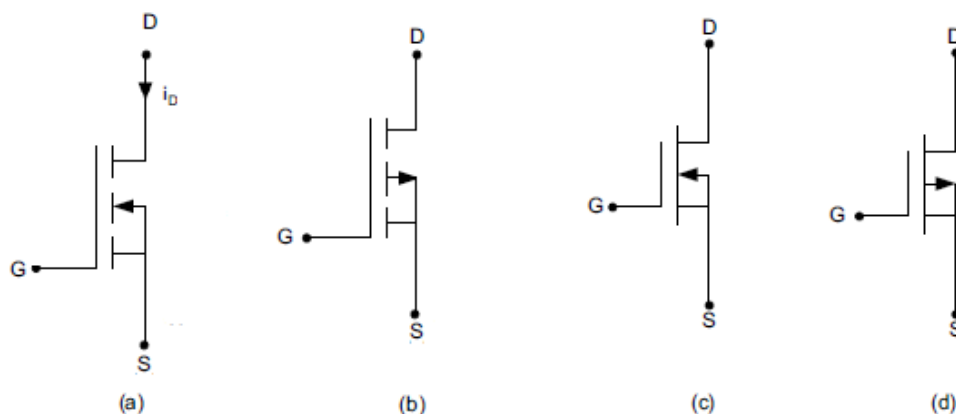
G (B) – řídicí elektroda (GATE)

Pomocí izolace hradla tranzistoru od polovodiče, se zvyšuje vstupní impedance (řadově až $10^{14} \Omega$) a tím se sníží výkonová spotřeba součástky. [4]

IG FET se rozlišuje na dva typy:

Ochuzovací – Průchodem proudu kanálem je ovlivněn napětím u_{GS} a závěrným napětím přechodu PN. Průchodem proudu i_D kanálem N vzniká úbytek napětí a to určuje závěrné napětí přechodu PN. S rostoucím úbytkem napětí dochází ke zvětšování nevodivé vrstvy přechodu PN a zúžení vodivé části kanálu. Dosažením hranice proudu i_D dojde k uzavření kanálu a napětí u_{DS} prudce stoupne. K uzavření kanálu dojde ochuzením kanálu o záporné náboje.

Obohacovací – Je-li napětí u_{GS} nulové a $u_{DS} > 0$, strukturou neprochází proud, protože mu stojí v cestě závěrně polarizovaný přechod PN. Dosažením prahového napětí u_{GS} kanál umožňuje průchod proudu mezi D a S. S postupným zvyšováním se kanály rozšiřují a umožní průchod většího proudu. [1][7]



a) obohacovací typ N

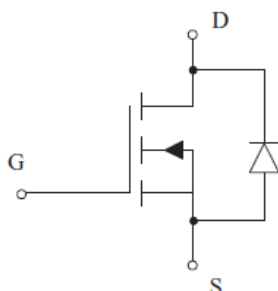
b) obohacovací typ P

c) ochuzovací typ N

d) ochuzovací typ P

Obr. 2.25 Schematické značky[1]

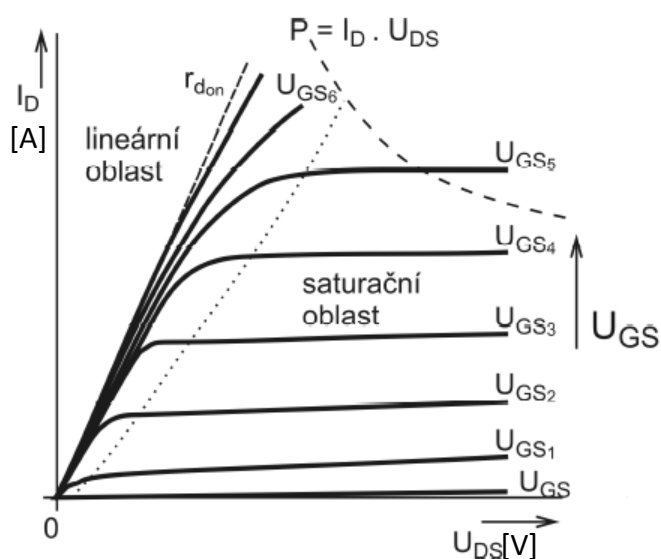
Pro spínací účely se používají IG FET obohacovacího typu s integrovanou antiparalelní diodou.



Obr. 2.26 IG FET s integrovanou antiparalelní diodou[1]

Voltampérová charakteristika

Výstupní charakteristika je měřena pro různé velikosti napětí U_{GS} . Strmost charakteristiky je dána odporem r_{don} , který je určen vodivostí křemíku. U napětí 1000V dosahuje jednotky ohmů, není možné je použít od proudu řádově desítky ampér. Z tohoto důvodu se tranzistory nevyrábějí pro vyšší napětí U_{DS} .

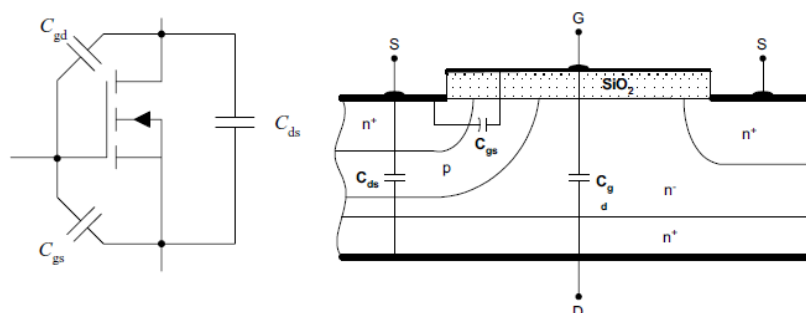


Obr. 2.27 VA charakteristika MOSFET tranzistoru[3]

Na obr. 2.28 jsou zobrazeny parazitní prvky, které mají vliv na sepnutí a vypnutí tranzistoru. Konkrétně parazitní kapacity snižují dobu sepnutí a dobu vypnutí. Kapacity jsou mezi jednotlivými elektrodami. Mezi vstupem a výstupem tranzistoru je C_{GD} , která je nelineární funkcí napětí. Při změně U_{DS} teče většina proudu C_{GD} .

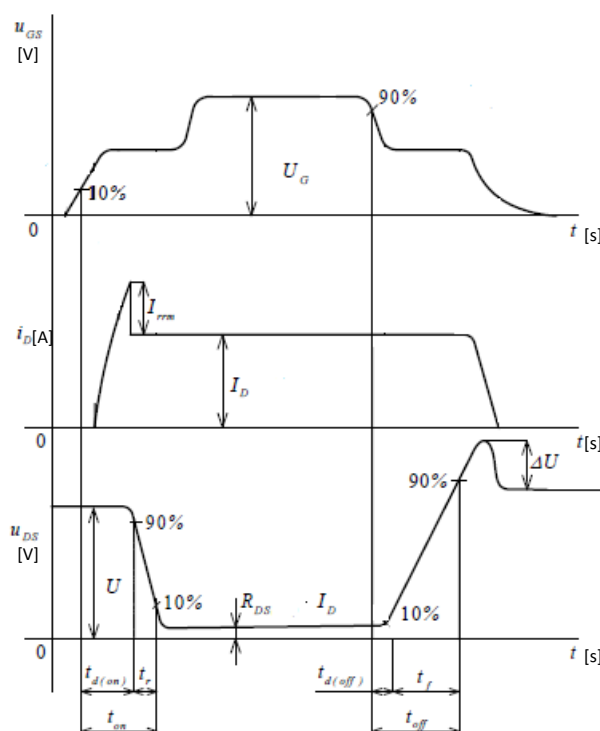
$$i_{GD} = C_{GD} \cdot \frac{du}{dt} \quad [A; F, V, s] \quad (2.13)$$

Překročí-li tento proud danou hodnotu, může U_{GS} překročit prahové napětí U_T a otevřít tím tranzistor. Kapacita C_{GS} je konstantní. Vlastní kapacity omezují rychlost sepnutí a vypnutí a tím se ovlivní časové průběhy.



Obr. 2.28 Parazitní kapacity[1]

Při sepnutí tranzistoru stoupne závěrný zotavovací proud I_{rrm} nulové diody D_0 , v té chvíli poklesne U_{DS} na hodnotu propustného napětí $R_{DS} \cdot I_D$. Při vypínání se sepne nulová dioda D_0 a odebírá proud zátěže, tím klesne proud I_D . [1][3][4]

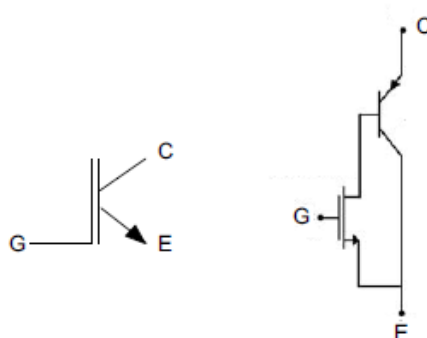


Obr. 2.29 Dynamické parametry tranzistoru RL+D₀[5]

MOSFET tranzistor dosahuje lepších dynamických vlastností než tranzistor bipolární a tím může dosahovat vyšších frekvencí, až desítek kHz. Napěťová hranice dosahuje až 300V a proudová hranice 2000A. Napěťová zatížitelnost dosahuje takových hodnot na úkor proudové zatížitelnosti. Na trhu převládá firma Infineon s výrobou MOSFET tranzistorů.

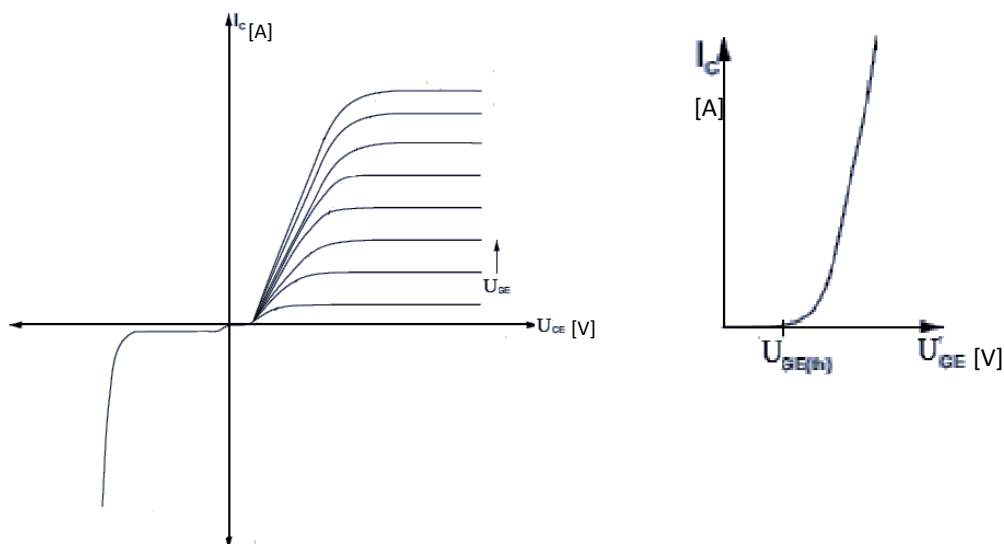
2.2.5 IGBT tranzistor

Tento tranzistor IGBT (**I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor – Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem) je kombinací bipolárního a unipolárního tranzistoru umožňující spínání velkých proudů a vysokých napětí. To je velká výhoda, na vstupu je prakticky nekonečně velký odpor s malým úbytkem v sepnutém stavu. Skládá se ze tří elektrod: **G** – řídicí elektroda, **C** – kolektor, **E** – emitor. Na schematické značce na obr. 2.30 lze pozorovat, že řídicí (vstupní) část je tvořena unipolární strukturou a výstupní část bipolární strukturou.



Obr. 2.30 Schematická značka a náhradní zapojení IGBT[1]

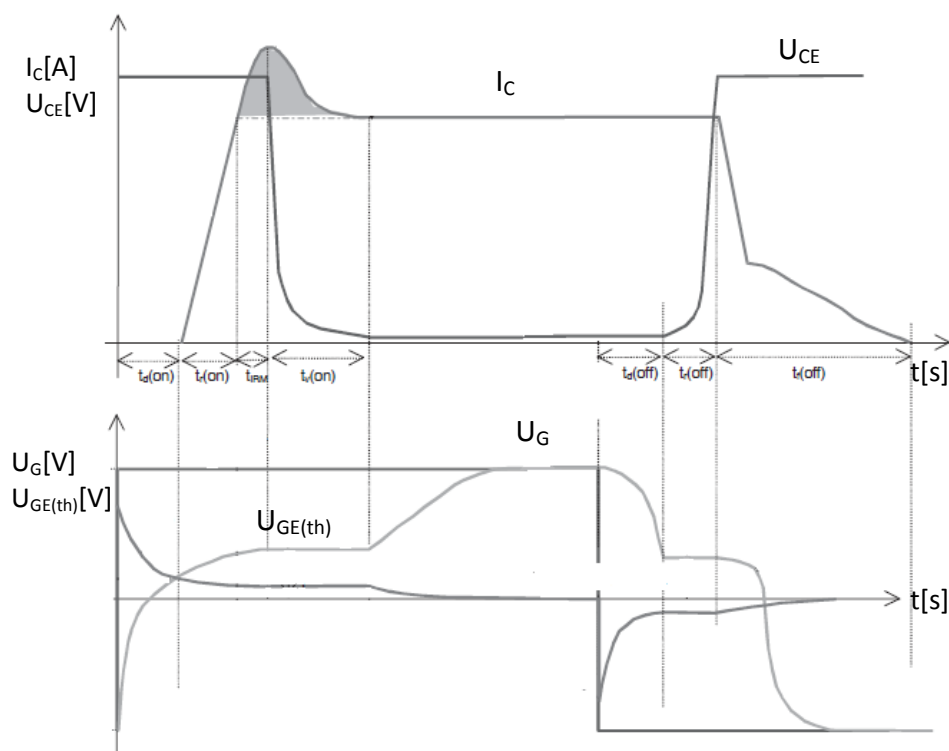
Při běžné činnosti je kolektor vzhledem k emitoru připojen na kladné napětí. Když je na řídicí elektrodě **G** nulový potenciál, tranzistorem teče zbytkový proud. Sepnutí IGBT proběhne přivedením napětíového signálu do řídicí elektrody a následným sepnutím bipolárního tranzistoru – zobrazeno na obr. 2.30 vpravo. [4]



Obr. 2.31 Výstupní VA a převodní charakteristika IGBT tranzistoru[2]

Na obr. 2.31 je výstupní charakteristika a převodní charakteristika. Z výstupní charakteristiky je patrné, že v oblasti nulového U_{GE} je podobná charakteristice diody a dále už je podobná charakteristice bipolárního tranzistoru. Převodní charakteristika znázorňuje závislost proudu I_C na napětí U_{GE} . Důležitým parametrem je zde napětí $U_{GE(th)}$, což je prahové napětí, při kterém začíná téct proud kolektorem I_C . [2]

Dynamické vlastnosti jsou ve srovnání s tranzistory MOSFET nepatrně horší. Zapínací t_{ON} a vypínací t_{OFF} doby jsou vyšší (obr. 2.32). Projevuje se zde také parazitní velká kapacita ve vstupní části tranzistoru, která se musí brát v úvahu při návrhu odporu R_G a vhodným dimenzováním zdroje U_G . Součástky mají vyšší proudovou i napěťovou zatížitelnost než MOSFET. Tranzistory s proudovým zatížením nad 100A se vyrábí s integrovanou antiparalelní diodou. Zbytkové napětí je vyšší než u bipolárních tranzistorů a nižší než u MOSFET tranzistoru. [7]



Obr. 2.32 Dynamické vlastnosti IGBT

Nejvyšší zapínací t_{ON} a vypínací t_{OFF} doby jsou udávány cca 2 μ s, což umožní spínání kmitočtů v desítkách kHz. Je možno spínat velké napětí okolo 6kV a vysoký proud kolem 4kA na úkor napětí. Čím je větší proudová zatížitelnost, tím menší napětí se může na IGBT tranzistor přivést.

3. Moderní trendy ve VPS

3.1 Součástky SiC

Polovodičové prvky založené na substrátu SiC, neboli karbidu křemíku jsou vyvíjeny pro použití v prostředí s teplotami vyšších než 350°C nebo s vysokou radiací. V takových podmínkách by tradiční součástky nefungovaly. Cílem této technologie je konstrukce součástek s krátkými zapínacími i vypínacími časy. Karbid křemíku je vhodný materiál pro použití ve vysokofrekvenčních i výkonových aplikacích. Důležité vlastnosti součástek SiC jsou vysoká tepelná vodivost a vysoká hodnota průrazného napětí. Díky těmto vlastnostem můžou nahradit klasické křemíkové součástky, jenže náklady na výrobu jsou tak vysoké, že se na trhu uplatňují více součástky klasické. Výrobou SiC se zabývají pouze výrobci CREE inc. a NASA Glenn. Největší využití těchto součástek bude ve vojenské nebo kosmické technice.[4]

3.2 Tranzistory CoolMOS

Součástky využívající technologii, kterou vyvinula firma Siemens. Jsou stavěné na vysokonapětové aplikace. V dnešní době se výrobou zabývá firma Infineon pro napětové hladiny 500-900V a propustných proudů do 80A. Tranzistory CoolMOS se vyznačují následujícími parametry:

- Mají 7x menší hodnotu odporu $r_{DS(on)}$ na stejné ploše součástky oproti klasickým MOSFET tranzistorům
- Ztrátový výkon je až 3x větší oproti klasickým součástkám ve stejném pouzdře
- Vynikají menšími vstupními a výstupními kapacitami, čímž dochází ke zlepšení spínacích vlastností – rychlejšímu spínání a snížení ztrát při nabíjení a vybíjení kapacit[4]

3.3 Technologie TrenchFET

Technologie se vyznačuje tím, že elektrody hradla nejsou na povrchu tranzistoru, ale jsou zapuštěny do vyleptaných drážek. Výhoda spočívá v tom, že se touto technologií sníží odpor v sepnutém stavu $r_{DS(on)}$, dosahuje hodnoty až jednotky mΩ. Jedinou nevýhodou této technologie je složitější struktura, čímž se zvýší parazitní kapacity. Je nutné volit mezi nízkým kmitočtem, při kterém je optimální účinnost (TrenchFET) a vysokým kmitočtem s vyšším odporem v sepnutém stavu (klasický MOSFET).[4]

4. Příslušenství

4.1 Chlazení polovodičových součástek

Působením parazitních vlastností na polovodičovém prvku vzniká ztrátový výkon, který je ve formě tepelné energie. Jedná se o ztráty v propustném směru, závěrném směru a ztráty spínací. Provozem polovodičových součástek vzniká ztrátový výkon v čipu, který se odvádí vedením až na povrch chladiče.

Výpočet jednotlivých ztrátových energií:

$$E_{ON} = \int_0^{t_{ON}} u_D(t) \cdot i_D(t) \cdot dt = U_F \cdot I_F \cdot t_{ON} [J; V, A, s] - \text{v propustném směru} \quad (4.1)$$

$$E_{OFF} = \int_0^{t_{OFF}} u_D(t) \cdot i_D(t) \cdot dt = U_D \cdot I_D \cdot t_{OFF} [J; V, A, s] - \text{v blokovacím směru} \quad (4.2)$$

$$E_{ZON} = \int_0^{t_{ON}} u_D(t) \cdot i_D(t) \cdot dt [J; V, A, s] - \text{při zapínání} \quad (4.3)$$

$$E_{ZOFF} = \int_0^{t_{OFF}} u_D(t) \cdot i_D(t) \cdot dt [J; V, A, s] - \text{při vypínání} \quad (4.4)$$

$$E_Z = E_{ON} + E_{OFF} + E_{ZON} + E_{ZOFF} [J; J, J, J, J] \quad (4.5)$$

$$P_Z = E_Z \cdot f [W; J, Hz] \quad (4.6)$$

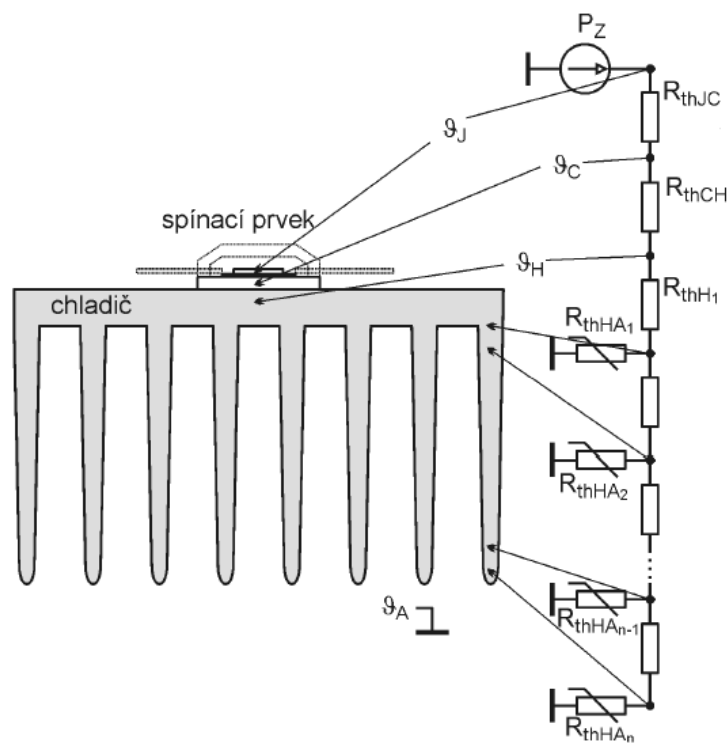
Celková ztrátová energie E_Z je dána celkovým součtem všech energií a celkový ztrátový výkon P_Z je závislý na opakovací frekvenci.

Vzniklé ztrátové teplo přechází do prostředí chladnějšího pomoci:

- a) Vedení (kondukce)
- b) Proudění (konvence)
- c) Záření (radiace)

Vzniklým malým rozdílem teplot mezi součástkou a okolím se uplatňují první dva principy. Nejčastějším způsobem pro odvedení tepla se používá chladič. Pro zvýšení účinnosti je možno použít **kapalinový chladič**, protože proudící kapalina odvede více tepla. Při přenosu tepla z chladiče do okolí se používá nucené chlazení pomocí ventilátoru nebo **pasivního chlazení**. Ztrátové teplo se popisuje pomocí tepelného schématu – obr. 4.1, které je ekvivalentní elektrickým veličinám. Zdroj proudu se nahradí zdrojem tepla, teplota nahradí napětí a tepelný odpor nahradí elektrický odpor.

$$\vartheta_J = \vartheta_A + P_Z \cdot (R_{thJC} + R_{thCH} + R_{thHA}) \quad (4.7)$$



Obr. 4.1 Tepelné schéma součástky[3]

Vysvětlivky k tepelnému schématu:

P_Z – střední ztrátový výkon [W]

ϑ_J – teplota přechodu součástky [°C]

ϑ_C – teplota pouzdra součástky [°C]

ϑ_H – teplota chladiče [°C]

ϑ_A – teplota okolí [°C]

R_{thJC} – tepelný odpor mezi přechodem a pouzdem součástky [K/W]

R_{thCH} – tepelný odpor mezi pouzdem součástky a chladičem [K/W]

R_{thHA} – tepelný odpor mezi chladičem a okolím [K/W]

Chlazení probíhá ve třech režimech:

- Statický – lze popsat pomocí tepelného schématu – obr. 4.1
- Periodický – při vysokých frekvencích se dá ztrátový výkon nahradit střední hodnotou, tepelný tok se ustálí stejně jako ve statickém režimu
- Neopakovaných dějů – do tepelného schématu se zahrnují tepelné kapacity prvků [3][8]

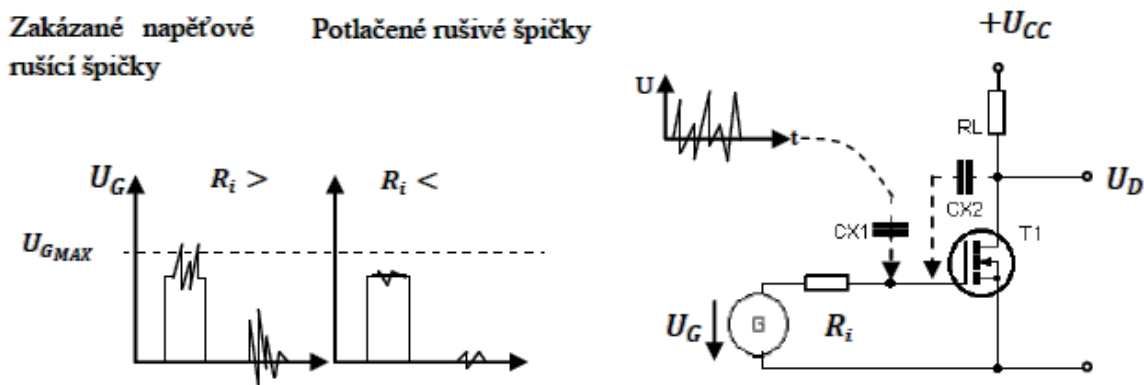
4.2 Budicí obvody – MOSFET, IGBT

Budicí obvody musí být schopny vygenerovat kvalitní signál pro řídicí elektrodu výkonového polovodičového prvku. Jeho důležitou vlastností je galvanicky oddělit řídicí část od části výkonové. Pro budicí obvod je potřeba galvanicky oddělený napájecí zdroj. Nejčastějším oddělením napájecího zdroje a budiče se používá impulsní transformátor. Další důležitou součástí budicího obvodu je elektronická ochrana proti zničení řízeného tranzistoru, která chrání součástku proti přetížení a zkratu.

Vlastnosti ideálního řídicího obvodu:

a) Malý dynamický vnitřní odpor

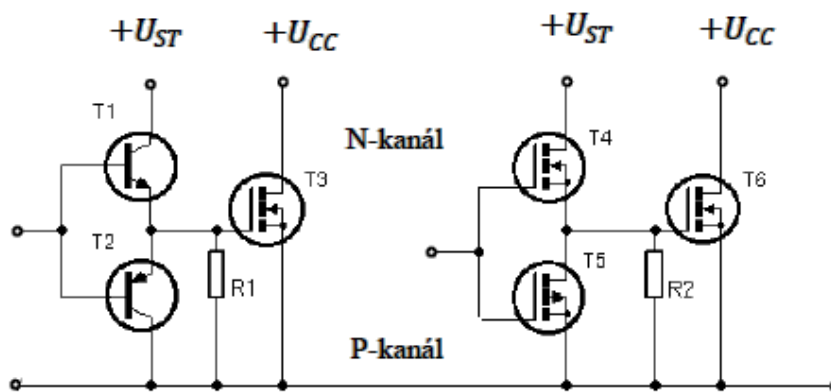
Na tomto dynamickém odporu závisí rychlost nabíjení a vybíjení vstupní kapacity výkonového tranzistoru. Tento odpor se značí R_i a je zakreslen na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Vazba rušivých napětí přes C_{X1} nebo C_{X2} při vysokém odporu R_i [9]

b) Odstranění oblasti vysokého odporu na charakteristice vnitřního odporu

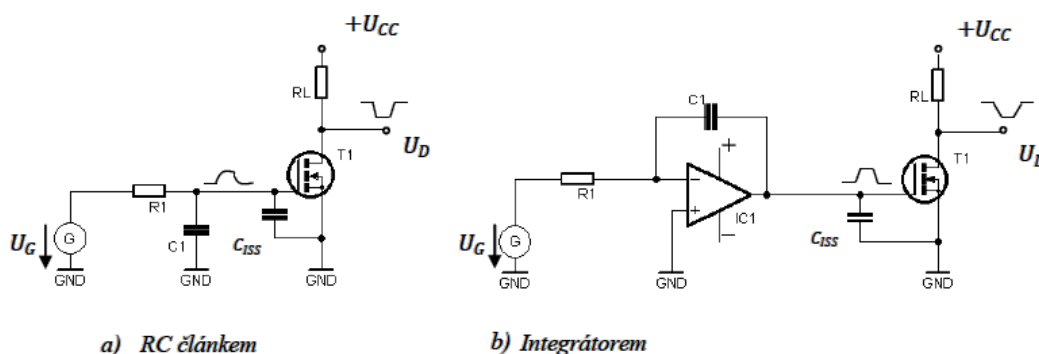
Při přechodu ze sepnutého do vypnutého stavu a opačně se po krátkou dobu vyskytuje stav vysokého vstupního odporu vlivem prahových napětí budících tranzistorů. Tento stav se odstraní zapojení rezistoru o hodnotě 4,7 – 10k Ω .



Obr. 4.3 Překlenutí vysokoohmového stavu při spínání generátoru rezistorem R_1 a R_2 [9]

c) Volitelná strmost hran impulsu při nízkém vnitřním odporu

Tranzistor je nutné zapínat a vypínat s definovanou strmostí náběžné a sestupné hrany. To se dá realizovat pomocí časové konstanty tvořené kapacitou a odporem nebo integrátorem.



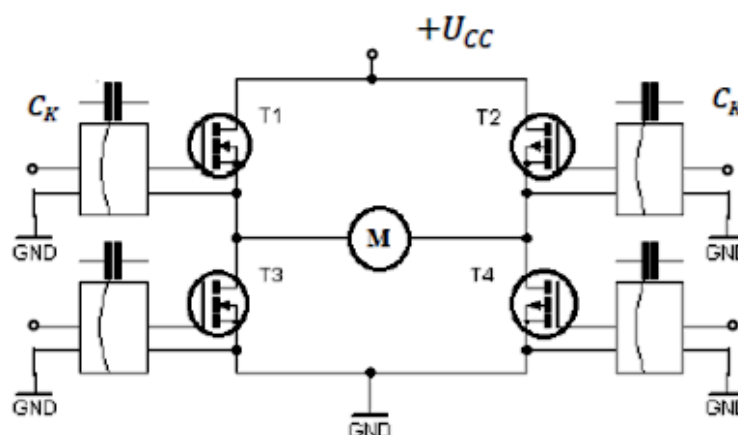
Obr. 4.4 Ovlivnění strmosti hran řídicího signálu[9]

d) Zanedbatelný klidový proud obvodu

Tranzistory potřebují malý řídicí výkon, takže by ani budicí obvod neměl odebírat velký klidový proud.

e) Plovoucí provoz spínacích tranzistorů

V můstkových zapojeních nejsou tranzistory T_1 a T_2 spojeny se zemí, proto je řídicí obvod galvanicky oddělen. Je nutné mít malé vazební kapacity C_K , aby nebyly zpětné vlivy na řídicí elektroniku.



Obr. 4.5 Plovoucí řízení celého můstku[9]

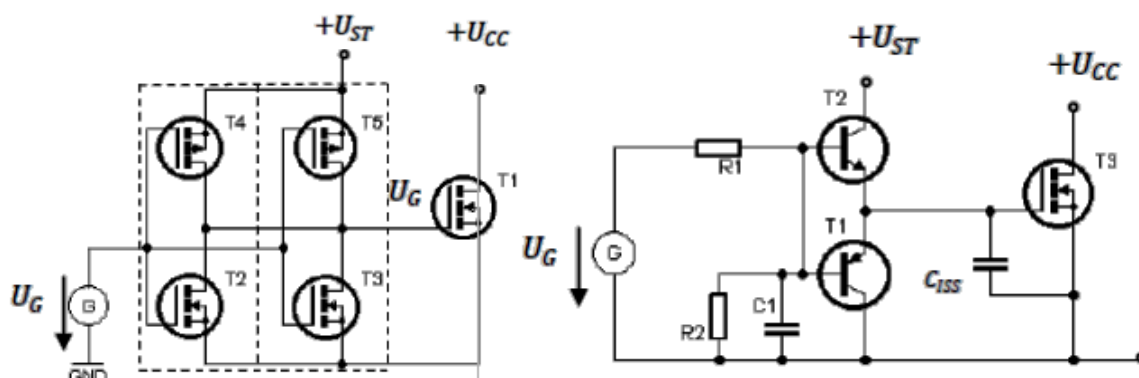
f) Malá vazební kapacita mezi řídicím obvodem a zátěží

Navržením malé vazební kapacity je menší pronikání rušení do řídicí části. Tudiž se volí co nejmenší možná vazební kapacita.

g) Konstrukce bez parazitních indukčností

Tuto konstrukci by měl obsahovat každý budicí obvod. Nejlepší je zapojit budicí obvod přímo na vývody tranzistoru.

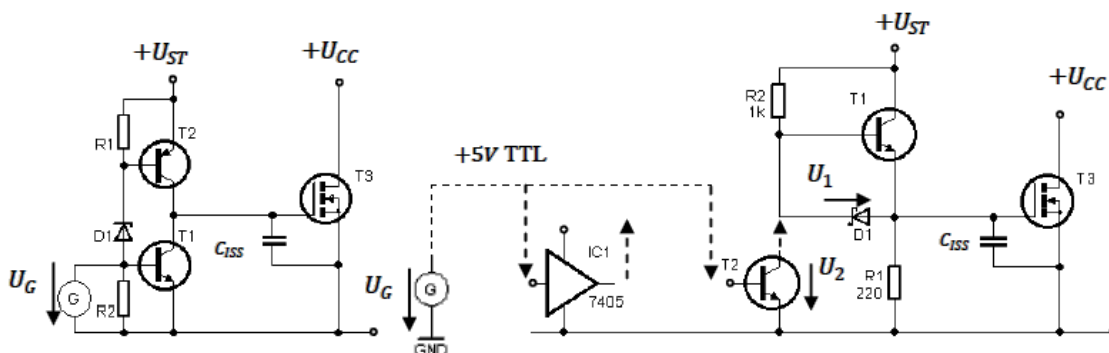
Provedení budicích obvodů:



Obr. 4.6 Budič CMOS a komplementární emitorový sledovač[9]

Budiče CMOS, jsou jednoduché a levné. Přivedený impuls obrací o 180° . Mají malou spotřebu a při vypnutí napájení U_{CC} mají velký vnitřní odpor.

Komplementární emitorový sledovač lze sestavit z diskrétních součástek, přiváděný signál není invertován. Při odpojení napájení U_{CC} je vnitřní odpor malý, protože při napětí U_G teče přes rezistor R_2 proud do báze T_1 . Doba náběhu se dá měnit pomocí rezistoru R_1 a kondenzátoru C_1 .



Obr. 4.7 Komplementární kolektorový budič a budicí stupeň „Totem–Pole“[9]

Komplementární kolektorový budič obrací fázi přivedeného impulsu, je možné rychlé vybíjení a nabíjení kapacity C_{1SS} . Při vypnutém napájení má vysoký vnitřní odpor. Jeho klidový proud závisí na zapojení. Může dojít k vysokým proudovým špičkám při přesahu spínání T_1 a T_2 .

Budicí stupeň „totem pole“ obrací fázi přivedeného impulsu. Velikost kolektorového proudu závisí na R_2 . Z důvodu co nejmenšího nahromaděného náboje je D_1 zapojena Schottkyho dioda. Nemá-li přivedeno napájecí napětí U_{ST} je hradlo spojeno s rezistorem R_1 se zemí. [9]

5. Výrobci VPS

ABB – je světová jednička v oblasti energetických a automatizačních technologií. Sídli v Curychu ve Švýcarsku. Firma zaměstnává 145 000 lidí a působí ve zhruba 100 zemích celého světa. Firemní akcie jsou obchodovatelné na burzách cenných papírů v Curychu, Stockholmu a v New Yorku. Společnost ve své současné podobě byla vytvořena v roce 1988, ale založena byla více než před 120 lety. ABB má sedm firemních výzkumných center po celém světě a investuje nemalé částky do výzkumu a vývoje. Výsledkem je celá řada vylepšení technologií, které tvoří základ naší moderní společnosti, od přenosu vysokých stejnosměrných napětí v dopravě až k nejmodernějším vybavením elektroniky lodí. Dnes ABB patří mezi dodavatele průmyslových motorů a generátorů na větrnou energii.[10]

INFINEON TECHNOLOGIES – se zaměřuje na tři hlavní problémy, kterým čelí moderní společnost: energetická účinnost, mobilita a bezpečnost. Nabízí polovodiče a systémová řešení pro automobilovou a průmyslovou elektroniku a pro bezpečnostní aplikace. Výrobky vynikají svou spolehlivostí, kvalitou a jejich inovativními a špičkovými technologiemi. Infineon působí prostřednictvím svých dceřiných společností v USA z Milpitas v Kalifornii, v asijsko–pacifickém regionu v Singapuru, a v Japonsku v Tokiu. Ve fiskálním roce 2012 (končí září 2012) společnost vykázala tržby ve výši 100 miliard Kč.[11]

SEMIKRON – Firma sídlící v Norimberku v Německu byla založena v roce 1951. Ve výrobních závodech, které se nachází v Německu, Brazílii, Číně, Francii, Itálii, Korei, Slovensku, Jižní Africe a v USA, pracuje přes 3 tisíce zaměstnanců. Semikron je jedničkou na trhu v oblasti diodových a tyristorových polovodičových modulů, zaujímá 30% podíl na celosvětovém trhu.[12]

IXYS UK WESTCODE LTD. – Byla založena v roce 1924 pod názvem Westcode Semiconductors. Dnes je společnost uznávána jako jeden z předních světových výrobců vysoce výkonových polovodičů. V počátcích společnost vyvinula produkty využívající vlastnosti selenu, germania a křemíku. Technologie výroby byla zavedena v roce 1957, používá se dodnes. V roce 2012 Westcode změnila svůj název na IXYS UK Westcode s.r.o. a pokračuje v dodávce vysoce technologických komponentů pro široké spektrum aplikací, jako jsou AC a DC pohony, usměrňování, záložní zdroje napájení, motorové soft-starty, doprava, indukční topení, výkonové klimatizace a mnoho dalších průmyslových použití. Skupina IXYS má výrobní závody v Německu, USA a Velké Británii.[13]

MITSUBISHI ELECTRIC – Společnost založena v roce 1921 v Japonsku se v počátku specializovala na výrobu a prodej elektrických ventilátorů, které se staly hitem. V následujícím desetiletí se společnosti podařilo uzavřít smlouvy pro rozvoj elektrické železniční sítě. Po roce 1930 Mitsubishi Electric začala výrobu, instalace a údržby výtahů a eskalátorů, dále také i zařízení pro výrobu elektrické energie. Světové prvenství mají jejich nové technologie v oblasti LED obrazovek pro sportovní arény, velký podíl CRT televizí na spotřebitelském trhu, jako první na světě vyvinuli spirálový eskalátor, nejrychlejší výtahy a mnohem více. Dnes má výrobní závody v 35 zemích s více než 117 000 zaměstnanci a tržby více než 600 miliard Kč.[14]

6. Porovnání VPS

6.1 Diody

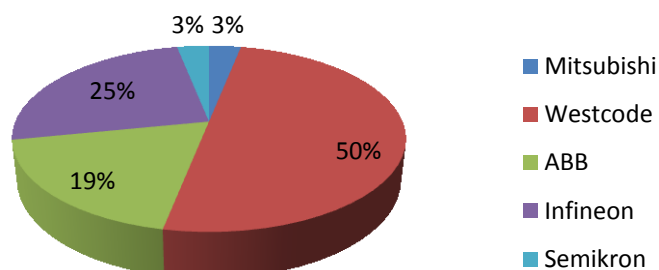
V předchozí kapitole je uvedeno několik nejznámějších výrobců výkonových polovodičových součástek. Každá z těchto vyjmenovaných společností se zabývá některými typy, výrobou diod se zabývají všichni. Tato podkapitola bude zaměřena na porovnání parametrů diod.

Každý výrobce nabízí velké množství různých typů diod. Pro přehlednost jsou vybrány jen diody s proudem I_{FM} od 5 kA až po maximální hodnotu, která byla vyrobena. V Tab. 6.1 jsou uvedeny nejdůležitější parametry:

- 1) maximální opakovatelná hodnota závěrného napětí U_{RRM}
- 2) maximální opakovatelná hodnota propustného proudu I_{FM}
- 3) propustné prahové napětí U_{TO}
- 4) diferenciální propustný odpor r_f
- 5) maximální neopakovatelná hodnota propustného proudu I_{FSM}
- 6) mezní přetěžovací integrál I^2t
- 7) náboj zotavení Q_{rr}

Tabulka je seřazena od nejmenšího maximálního opakovatelného propustného proudu I_{FM} až po nejvyšší. Hodnota mezního přetěžovacího integrálu I^2t je udávána pro časový interval 10 ms. Z tabulky je patrné, že nejvíce typů diod v rozmezí proudů I_{FM} vyrábí společnost IXYS UK WESTCODE LTD. – viz. obr. 6.2.

Při pohledu na tabulku lze porovnat napětí např. 600V. Je zde 7 typů součástek. Z těchto typů je nejlepší typ D8407N od firmy Infineon, z důvodu největšího proudového zatížení, jeho hodnota dosahuje až $I_{FM}=8400A$. V této kategorii 600V Infineon zastupuje největší podíl. V dalším zaměření na 2200V má nejvíce součástek firma Westcode a taky má nejvyšší proudové zatížení 10,5kA. Firma ABB se zaměřila nejvíce pro napětí $U_{RRM}=2800V$. Výkony těchto součástek dosahují až 7300A.



Obr. 6.1 Příklad pastilkového pouzdra diody[13]

Obr. 6.2 Grafické znázornění zastoupení výrobců

Tab. 6.1 Přehled trhu polovodičových diod z hlediska I_{FM}

Typ	$U_{RRM}[V]$	$I_{FM}[A]$	$U_{TO}[V]$	$r_f[m\Omega]$	$I_{FSM}[kA]$	$I^2t[kA^2s]$	$Q_{rr}[\mu C]$	Výrobce
FD5000AV-100	1200	5000	-	-	70	20000	-	Mitsubishi
W5092ZD350	3500	5092	0,874	0,079	58	16800	-	Westcode
W5130MK280	2800	5130	0,91	0,07	42	8820	5500	Westcode
5SDD 54N4000	4000	5200	0,8	0,086	85	36300	18000	ABB
D3501N	4300	5220	0,734	0,134	63	19850	7200	Infineon
W5282ZD300	3000	5282	0,97	0,064	60	18000	-	Westcode
W5292TD560	5600	5292	1,027	0,111	52,7	13900	18000	Westcode
W5334MK220	2200	5334	0,892	0,069	46,8	10950	4100	Westcode
5SDD 51L2800	2800	5380	0,77	0,082	65	21130	7000	ABB
W5439VF140	1400	5439	0,65	0,067	52	13500	-	Westcode
W5636MC150	1500	5636	0,698	0,059	46	10580	2250	Westcode
W5696VF140	1400	5696	0,65	0,059	53	14000	-	Westcode
D5810N	600	5800	0,7	0,04	81	32800	-	Infineon
D5807N	600	5800	0,7	0,04	81	32800	-	Infineon
W5838ZD220	2200	5838	0,8	0,074	64	20500	-	Westcode
SKN 6000	600	6000	0,7	0,04	60	18000	-	Semikron
D6247N	600	6242	0,66	0,047	60	18000	-	Infineon
W6262ZD240	2400	6262	0,74	0,065	67	22400	-	Westcode
5SDD 65H2400	2400	6520	0,87	0,057	59	17405	4400	ABB
5SDD 60N2800	2800	6830	0,8	0,05	87	38500	6300	ABB
W6908FD500	5000	6908	0,767	0,092	70	24500	22000	Westcode
5SDD 70H2000	2000	7030	0,861	0,046	65	28125	4000	ABB
W7045MC060	600	7045	0,793	0,033	54	14600	1600	Westcode
D4201N	2200	7130	0,668	0,083	88	38700	1750	Infineon
5SDD 60Q2800	2800	7385	0,8	0,05	87	38500	6300	ABB
W7675ZD140	1400	7675	0,65	0,05	68	23100	-	Westcode
D8320N	600	8320	0,7	0,024	103	53000	-	Infineon
W8405ZD140	1400	8405	0,67	0,038	72	25900	-	Westcode
D8407N	600	8408	0,66	0,036	81	32800	-	Infineon
W8570TJ220	2200	8570	0,69	0,05	70,2	24600	5250	Westcode
D6001N	5000	9290	0,674	0,104	118	69600	15000	Infineon
W104CFD220	2200	10434	0,711	0,041	83,7	35000	7500	Westcode

6.2 Tyristory

Pro porovnávání tyristorů jsou vybrány součástky s parametrem I_T až od hodnoty 3kA a to z důvodů velkého množství typů součástek. Proto je tabulka zredukována. Nejdůležitější parametry tyristorů jsou uvedeny v následujících bodech:

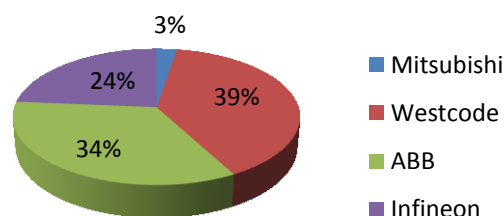
- 1) maximální opakovatelná hodnota závěrného napětí U_{RRM}
- 2) propustný proud tyristoru I_T
- 3) propustné prahové napětí U_{TO}
- 4) diferenciální propustný odpor r_f
- 5) maximální neopakovatelná hodnota propustného proudu I_{FSM}
- 6) mezní přetěžovací integrál I^2t
- 7) náboj zotavení Q_{rr}

Tabulka je řazena podle propustného proudu tyristoru I_T od nejnižší hodnoty po nejvyšší. Součástky jsou porovnávány od největších světových výrobců. Firma Semikron zde není zařazená, protože vyrábí součástky pro menší proudy. Největší zastoupení zde má firma Westcode s 15 typy součástek a na druhém místě firma ABB s 13 typy součástek. Mezní přetěžovací interval I^2t je pro všechny tyristory udáván pro čas $t=10ms$.

Maximální opakovatelná hodnota závěrného napětí U_{RRM} se dá rozdělit do skupin pro napětí 600V, 1800V, 2200V, 2800V a 5200V. Ve skupině součástek pro napětí 600V se může pochlubit firma Westcode s jejím maximálním propustným proudem I_T kolem 7kA, ale její nevýhodou je její velký náboj zotavení Q_{rr} , čímž se stává pomalejší při vypínání. Při pohledu do tabulky na hodnotu 1800V je zřejmé že vyniká firma ABB se 2 typy součástek. S proudem I_T dosahují hodnoty kolem 6kA a zároveň se vyznačuje nejmenším zotavovacím nábojem Q_{rr} . Westcode vyrábí jako jediná firma tyristory pro napětí 2200V, kde proud dosahuje až 6kA. Ve skupině napětí 2800V jsou jen výrobci ABB a Westcode. Zde má nejlepší součástky firma ABB, jak z hlediska proudového zatížení I_T , tak i z nízkého diferenciálního propustného odporu r_f a zotavovacího náboje Q_{rr} . Firma ABB je jedničkou i v oblasti pro napětí 5200V, kde má 3 typy součástek dosahujících hodnot I_T až 5kA. Tyto součástky mají vyšší propustné prahové napětí U_{TO} a nižší r_f a Q_{rr} .



Obr. 6.3 Příklad pouzdra tyristoru[11]



Obr. 6.4 Grafické znázornění zastoupení výrobců

Tab. 6.2 Přehled trhu polovodičových tyristorů z hlediska I_T

Typ	$U_{RRM}[V]$	$I_T[A]$	$U_{TO}[V]$	$r_f[m\Omega]$	$I_{FSM}[kA]$	$I^2t[kA^2s]$	$Q_{rr}[\mu C]$	Výrobce
N3029ZD280	2800	3029	0,947	0,154	38,2	7300	6800	Westcode
5STP 30T1800	1800	3108	0,984	0,081	47	11050	2800	ABB
T3160N	1800	3160	0,86	0,082	57	16245	-	Infineon
T3101N	4400	3160	1,01	0,185	83	34000	15000	Infineon
5STP 28L4200	4200	3170	0,97	0,158	52	13500	4100	ABB
T3441N	5200	3200	0,764	0,234	79	31000	20000	Infineon
N3229QK060	600	3229	0,926	0,067	28	3920	850	Westcode
5STP 34T1600	1600	3370	0,94	0,066	49	12010	2800	ABB
N3533ZD220	2200	3533	0,97	0,095	50	12500	2700	Westcode
T3401N	3600	3560	0,826	0,143	87	37850	10500	Infineon
5STP 34N5200	5200	3600	1,03	0,16	55	15100	5200	ABB
T3710N	600	3710	0,75	0,048	60	18000	-	Infineon
5STP 33L2800	2800	3740	0,95	0,1	60	18000	2200	ABB
N3839TD350	3500	3839	0,95	0,14	49,5	12250	13000	Westcode
5STP 34Q5200	5200	3875	1,03	0,16	55	15100	5200	ABB
T4021N	5350	3880	0,93	0,145	100	50000	28000	Infineon
N3904HK220	2200	3904	0,92	0,111	50,9	12950	4700	Westcode
N3930ZD160	1600	3930	0,841	0,08	54	14600	4000	Westcode
5STP 38N4200	4200	3960	0,95	0,13	60	18000	5000	ABB
T4301N	2900	4030	1,2	0,772	91	41400	12000	Infineon
N4085ZD120	1200	4085	0,85	0,07	64	20500	1850	Westcode
T3801N	3600	4150	0,826	0,143	87	37850	10500	Infineon
N4151FD420	4200	4151	0,85	0,17	54	14600	13000	Westcode
5STP 42U6500	6500	4250	1,24	0,162	71,4	25500	7500	ABB
5STP 38Q4200	4200	4275	0,95	0,13	60	18000	5000	ABB
N4316MK060	600	4316	0,84	0,053	45,4	10300	1300	Westcode
T4771N	2900	4340	1,2	0,772	91	41400	12000	Infineon
N4400TD280	2800	4400	0,9	0,1	54	14600	12000	Westcode
N4472HK180	1800	4472	0,986	0,068	59	17400	4650	Westcode
N4803FD350	3500	4803	0,92	0,11	60	18000	12000	Westcode
FT5000AP-8	400	5000	1,25	-	100	42000	-	Mitsubishi
5STP 52U5200	5200	5060	1,04	0,115	85	36300	8000	ABB
5STP 45N2800	2800	5080	0,86	0,07	75	28100	3800	ABB
N5177FD280	2800	5177	0,8	0,1	67,5	22800	11000	Westcode
5STP 45Q2800	2800	5490	0,86	0,07	75	28100	3800	ABB
N5946FD220	2200	5946	0,855	0,065	72	25900	5800	Westcode
5STP 50Q1800	1800	6100	0,9	0,05	94	41280	3000	ABB
N6974HK060	600	6974	0,853	0,029	65	21130	1700	Westcode

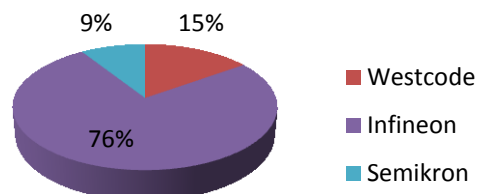
6.3 MOSFET tranzistory

Unipolárních tranzistorů je mnoho, vyrábí se jako diskrétní součástky nebo v podobě modulu, kde je jeden tranzistor nebo více v zapojení do můstku nebo polomůstku. V tabulce jsou porovnány jen diskrétní tranzistory a tranzistory v modulu s jedním tranzistorem. Největší podíl na trhu má firma Infineon, která vyrábí velké množství MOSFET tranzistorů různých typů. Tranzistory MOSFET se vyznačují následujícími parametry:

- 1) maximální hodnota napětí U_{DS} mezi vývody Drain a Source
- 2) propustný proud tranzistoru I_D
- 3) odpor v sepnutém stavu $R_{DS(on)}$
- 4) doba zpoždění t_d
- 5) doba nárůstu t_r
- 6) doba přesahu t_s
- 7) doba poklesu t_f

V tabulce jsou součástky seřazeny od nejmenšího propustného proudu I_D až po největší. Spodní hranice proudu I_D začíná od 100A. Firmy ABB a Mitsubishi se do tabulky nezařadily, protože firma ABB MOSFET nevyrábí a Mitsubishi vyrábí jen můstková zapojení tranzistorů. Pro všechny součástky je zde řídicí napětí $U_{GS} = \pm 20V$. Z tabulky je patrné, že Westcode vyrábí nejlepší součástky z hlediska propustného proudu tranzistoru I_D a z odporu v sepnutém stavu $R_{DS(on)}$. Následující tabulka se dá rozdělit dle napětí do 3 skupin:

- 1) 100V – Firma Infineon v této kategorii vyrábí tranzistory pro malé proudy od 100A do 180A. Westcode vyrábí pro větší proudy od 600A do 1200A, zároveň součástky vyrobené firmou Westcode mají malý odpor v sepnutém stavu $R_{DS(on)}$, ovšem mají delší dobu sepnutí a rozepnutí. Infineon má tranzistory sice nízkého propustného proudu I_D , ale za to jsou rychlé při spínání.
- 2) 120V a 150V – Do této skupiny spadají jen součástky vyrobené firmou Infineon, které mají rozmezí propustného proudu I_D od 100A do 180A. Doby nárůstu t_r i doby poklesu t_f jsou téměř shodné.
- 3) 200V – V této kategorii jsou jen 4 součástky – od Semikronu a od Westcode. Westcode má výrazně větší propustný proud I_D oproti Semikronu – dosahuje skoro 2kA. Westcode má menší odpor v sepnutém stavu i mírně delší dobu poklesu a nárůstu.



Obr. 6.5 Příklad pouzdra MOSFET[12] Obr. 6.6 Grafické znázornění zastoupení výrobců

Tab. 6.3 Přehled trhu polovodičových MOSFET tranzistorů z hlediska I_D

Typ	$U_{DS}[V]$	$I_D[A]$	$R_{DS(on)}[m\Omega]$	$t_d[ns]$	$t_r[ns]$	$t_s[ns]$	$t_f[ns]$	Výrobce
IPB042N10N3 G	100	100	4,2	27	59	48	14	Infineon
IPI045N10N3 G	100	100	4,5	27	59	48	14	Infineon
IPI030N10N3 G	100	100	3	34	58	84	28	Infineon
IPI04CN10N G	100	100	3,9	51	117	114	38	Infineon
BSC079N10NS G	100	100	7,9	36	60	57	17	Infineon
BSC082N10LS G	100	100	8,2	28	36	80	17	Infineon
BSC046N10NS3G	100	100	4,6	16	14	41	11	Infineon
IPP030N10N3 G	100	100	3	34	58	84	28	Infineon
IPP045N10N3 G	100	100	4,5	27	59	48	14	Infineon
IPP04CN10N G	100	100	3,9	51	117	114	38	Infineon
IPP05CN10N G	100	100	5,4	42	63	96	31	Infineon
IPI076N12N3 G	120	100	7,6	24	50	39	10	Infineon
IPP048N12N3 G	120	100	4,8	31	55	64	19	Infineon
IPP076N12N3 G	120	100	7,6	24	50	39	10	Infineon
IPB072N15N3 G	150	100	7,2	38	52	69	21	Infineon
IPI075N15N3 G	150	100	7,5	38	52	69	21	Infineon
IPP075N15N3 G	150	100	7,5	38	52	69	21	Infineon
IPB027N10N3 G	100	120	2,7	34	58	84	28	Infineon
IPB038N12N3 G	120	120	3,8	35	52	70	21	Infineon
IPI041N12N3 G	120	120	4,1	35	52	70	21	Infineon
IPP041N12N3 G	120	120	4,1	35	52	70	21	Infineon
IPB065N15N3 G	150	130	6,5	25	35	46	14	Infineon
SKM 121 AR	200	130	18	60	60	240	70	Semikron
IPB039N10N3 G	100	160	3,9	27	59	48	14	Infineon
IPB025N10N3 G	100	180	2,5	34	58	84	28	Infineon
IPB036N12N3 G	120	180	3,6	35	52	76	21	Infineon
SKM 180 A020	200	180	9	100	200	900	220	Semikron
SKM 111 AR	100	200	7	60	220	270	200	Semikron
VMO580-02F	200	580	3,8	210	500	900	350	Westcode
VMO550-01F	100	590	2,1	250	500	800	200	Westcode
VMO650-01F	100	690	1,8	250	500	800	200	Westcode
VMO1200-01F	100	1220	1,25	360	1620	460	1020	Westcode
VMO1600-02P	200	1900	1,7	320	1220	620	700	Westcode

6.4 IGBT tranzistory

Tranzistory IGBT vyrábí všichni uvedení výrobci v kapitole 4. Výrobce Infineon zde není uvedený, protože se zaměřují na výrobu tranzistorů menších propustných proudů I_C . Pro přehlednost se v tabulce uvádí proudy od 600A do cca 3,6kA. Všechny IGBT tranzistory se řídí napětím $\pm 20V$. Mitsubishi vyrábí pro napětí 250V, 600V a 1200V. Semikron se zaměřil na výrobu tranzistorů pro napětí 1200V a 1700V. ABB se specializuje na součástky pro napětí 1700V, 2500V, 3300V a 4500V, Westcode na tranzistory 2500V a 4500V. K nejdůležitějším parametrů IGBT tranzistoru patří tyto:

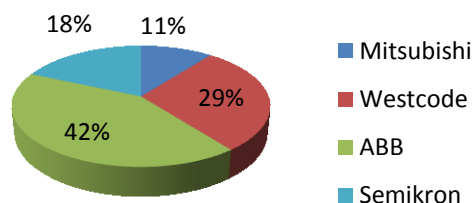
- 1) maximální hodnota napětí U_{ce} mezi vývody kolektoru a emitoru
- 2) propustný proud tranzistoru I_c
- 3) doba zpoždění t_d
- 4) doba nárůstu t_r
- 5) doba přesahu t_s
- 6) doba poklesu t_f
- 7) saturační napětí U_{CESAT} – při teplotě 25°C

Následující tabulka se dá třídit podle napětí U_{CE} do skupin:

- 1) 1200V – Pro toto napětí vyrábí součástky Semikron a Mitsubishi, firma Semikron oproti Mitsubishi má výhodu, že součástky mají kratší dobu zapnutí i vypnutí, mají menší saturační napětí a dosahují maximálního propustného proudu I_C až 900A.
- 2) 1700V – V této kategorii jsou výrobci Semikron a ABB. Semikron vyrábí součástky pro malé proudy od 600A do 800A. ABB dosahuje větších proudových zatížení tranzistorů, hodnoty se pohybují 1600–3600A. Semikron má kratší doby zapnutí i vypnutí, má menší i saturační napětí. Firma Semikron se zaměřila na rychlost součástek a firma ABB se zaměřila na proudovou zatížitelnost.
- 3) 2500V – Patří zde součástky firmy Westcode a ABB. Westcode má součástky dlouhých spínacích časů i větších saturačních napětí. ABB má u součástek o řád nižší spínací doby.
- 4) 3300V – Firma ABB jako jediná vyrábí součástky pro napětí 3300V. Proudů těchto součástek se pohybují od 800A do 1500A. Zapínací a vypínací doby jsou srovnatelné, liší se jen v desítkách ns. Součástky jsou konstruovány pro saturační napětí 2,9V a 3,4V.
- 5) 4500V – Tato napětíová úroveň má nejvíce typů součástek (11 typů), které vyrábějí firmy Westcode a ABB. Při porovnávání proudových zatížení (600A, 800A a 1200A) má ABB výrazně kratší doby spínání a menší saturační napětí oproti Westcode. Výrobce Westcode dosahuje v IGBT tranzistorech proudu až 2400A.



Obr. 6.7 Příklad pouzdra IGBT[12]



Obr. 6.8 Grafické znázornění zastoupení výrobců

Tab. 6.4 Přehled trhu polovodičových IGBT z hlediska I_C

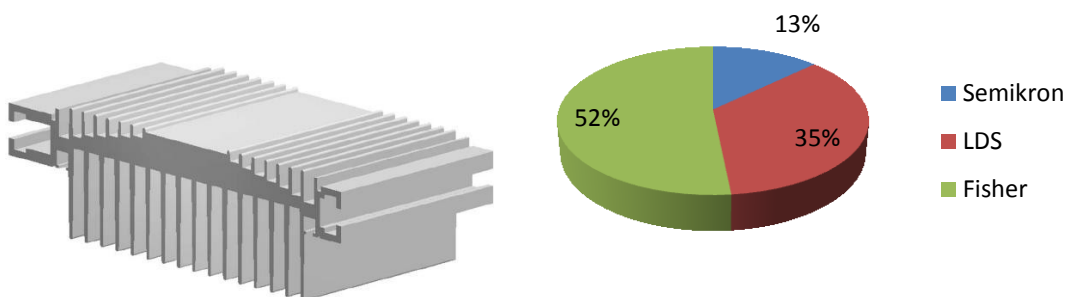
Typ	$U_{CE}[V]$	$I_C[A]$	$t_d[ns]$	$t_r[ns]$	$t_s[ns]$	$t_f[ns]$	$U_{CESAT}[V]$	Výrobce
CM600HA-5F	250	600	1000	4000	1000	500	1,7	Mitsubishi
CM600HU-12H	600	600	300	600	350	300	3	Mitsubishi
CM600HA-24A	1200	600	660	190	700	350	3	Mitsubishi
CM600HU-24H	1200	600	300	700	450	350	3,7	Mitsubishi
SKM600GA12V	1200	600	710	85	930	98	2,2	Semikron
SKM600GA12T4	1200	600	177	90	600	100	2,05	Semikron
SKM 600GA176D	1700	600	290	70	890	160	2,45	Semikron
T0600TB45A	4500	600	1400	2100	1200	1500	3,3	Westcode
5SNA 0600G650100	6500	600	570	240	1860	960	4,8	ABB
5SNA 0650J450300	4500	650	700	170	1920	540	2,9	ABB
5SNA 0750G650300	6500	750	980	300	5520	590	2,9	ABB
SKM 800GA126D	1200	800	220	100	860	135	2,15	Semikron
SKM 800GA176D	1700	800	230	90	1030	160	2,45	Semikron
5SNA 0800N330100	3300	800	525	200	1210	460	3,4	ABB
5SNA 0800J450300	4500	800	860	170	2220	600	2,6	ABB
T0800EB45G	4500	800	1800	3300	3000	2400	3,2	Westcode
T0800TB45E	4500	800	2000	4000	4500	2100	3,2	Westcode
T0850VB25E	2500	850	1100	2000	1500	6000	2,35	Westcode
SKM900GA12E4	1200	900	200	100	620	110	2,08	Semikron
T0900EB45A	4500	900	2200	3400	1900	2400	3,4	Westcode
5SNA 1000N330300	3300	1000	530	255	1640	385	2,9	ABB
T1200TB25A	2500	1200	1000	2500	1500	8300	2,45	Westcode
5SNA 1200G330100	3300	1200	500	230	1330	440	3,4	ABB
5SNA 1200G450350	4500	1200	750	230	2470	660	2,6	ABB
T1200EB45E	4500	1200	1800	3000	1600	2200	3,2	Westcode
5SNA 1500E250300	2500	1500	490	270	1380	480	2,1	ABB
5SNA 1500E330305	3300	1500	590	270	1750	440	2,9	ABB
5SNA 1600N170100	1700	1600	300	190	1140	170	2,6	ABB
T1600GB45G	4500	1600	2200	4400	5100	2300	3,2	Westcode
5SNA 1800E170100	1700	1800	300	250	1000	230	2,6	ABB
T1800GB45A	4500	1800	1600	3300	4000	2000	3,2	Westcode
5SNA 2000J170300	1700	2000	520	310	1180	340	2,6	ABB
T2250AB25E	2500	2250	1200	2700	1800	8500	2,35	Westcode
5SNA 2400E170100	1700	2400	320	275	1090	265	2,6	ABB
5SNA 2400E170305	1700	2400	480	240	1280	250	2,3	ABB
T2400GB45E	4500	2400	1700	3800	6000	1900	3,2	Westcode
5SNA 3600E170300	1700	3600	510	310	1260	300	2,8	ABB

6.5 Chladiče

Chladiče jsou nedílnou součástí výkonových polovodičových součástek, odvádí teplo ze součástky do okolí, proto jsou důležité následující parametry:

- 1) tepelný odpor mezi chladičem a okolím R_{thHA} bez ventilátoru
- 2) tepelný odpor mezi chladičem a okolím $R_{thHAvent}$ s ventilátorem
- 3) hmotnost chladiče m

Nejdůležitější jsou první 2 parametry, udávají tepelný odpor chladiče bez a s ventilátorem. Čím je menší tepelný odpor mezi chladičem a okolím R_{thHA} , tím chladič lépe odvádí teplo. V poznámce je uvedena buď rychlost proudícího vzduchu ventilátoru v , nebo výkon P , při kterém byla dosažena hodnota R_{thHA} . Vzduchové chladiče se vyrábějí pro součástky hlavně pro provedení: pastilky, izolované moduly nebo šroubované zařízení. Výrobci chladičů, kteří jsou zde porovnáváni: Semikron, LDS system a Fisher elektronik. LDS system má chladičů velké množství, je zde uvedena jen část jejich nabídky.



Obr. 6.9 Provedení vzduchového chladiče[12] Obr. 6.10 Grafické znázornění zastoupení výrobců

Tab. 6.5 Přehled trhu vzduchových chladičů

Typ	R_{thHA} [K/W]	$R_{thHAvent.}$ [K/W]	m[kg]	Použití	Výrobce	* Pozn.
N4	-	0,03*	20,1	pastilky	Semikron	v=8 m/s
P1	0,4*	0,15	2,2	úsměřnovače	Semikron	P=200W
P11	0,195*	0,092	7,5	pastilky	Semikron	P=300W
P16	-	0,024	7	izolované moduly	Semikron	
P17	0,47 *	0,085	3	pastilky	Semikron	P=120W
P18	0,366 *	-	3,13	pastilky	Semikron	P=120W
P21	-	0,019 *	12,2	izolované moduly	Semikron	v=11 m/s
P3	0,33 *	0,108	3,1	izolované moduly	Semikron	P=200W
P303	0,11	0,04 *	10,14	-	LDS	v=3m/s
P343	0,045	0,02 *	35,95	-	LDS	v=3m/s
P345	0,4	0,15 *	6,23	-	LDS	v=3m/s
P372	0,035	0,012 *	52,03	-	LDS	v=3m/s
P375	0,06	0,02 *	25,62	-	LDS	v=3m/s
P394	0,35	0,15 *	3,29	-	LDS	v=3m/s
P4	0,27 *	-	4,1	šroubované zařízení	Semikron	P=200W
P405	0,17	0,06 *	19,03	-	LDS	v=3m/s
P406	0,16	0,06 *	22,25	-	LDS	v=3m/s
P471	0,24	0,1 *	6,02	-	LDS	v=3m/s
P474	0,032	0,016 *	57,6	-	LDS	v=3m/s
P8	0,3 *	0,055	3,45	pastilky	Semikron	P=200W
P8,5	0,3	0,07 *	2,9	pastilky	Semikron	v=6m/s
P9	0,215 *	0,053	8,2	pastilky	Semikron	P=300W
Px308	0,0264	-	12,2	izolované moduly	Semikron	
R4A	1,4	0,38 *	0,6	izolované moduly	Semikron	v=4m/s
SK 440	0,07	0,034	-	-	Fisher	
SK 441	0,046	0,022	-	-	Fisher	
SK 458	0,058	0,028	-	-	Fisher	
SK 461	0,035	0,018	-	-	Fisher	
SK 497	0,076	0,038	-	-	Fisher	
SK 498	0,077	0,038	-	-	Fisher	
U3	0,162 *	0,061	24,1	pastilky	Semikron	P=700W

7. Závěr

Výsledkem této bakalářské práce je průzkum trhu v oblasti výkonových polovodičových součástek. Průzkum je zaměřen na celosvětový trh nejvýznamnějších výrobců. Každý výrobce vyniká v jiných specifických parametrech VPS.

Např. u tyristorů výrobce Infineon má u některých součástek výrazně vyšší diferenciální propustný odpor oproti ostatním tyristorům. Také má vyšší náboj zotavení. Firma ABB a Infineon vynikají se součástkami s maximální hodnotou opakovatelného závěrného napětí 4-6kV, tím lze součástky použít ve vyšších napěťových úrovních.

Tranzistory MOSFET se oproti ostatním součástkám vyrábějí druhově méně, jsou na nižší napětí i nižší proudy. Nejvíce součástek zde má firma Infineon, jejíž tranzistory jsou sice určeny pro nižší proudy, ale jsou velmi rychlé při zapínání a vypínání. Právým opakem je výrobce Westcode, který se zabývá vyšším proudovým zatížením až 2kA s výrazně delší dobou zapnutí i vypnutí.

Ve výrobě IGBT tranzistorů z hlediska maximálního propustného proudu vynikají firmy ABB a Westcode. IGBT tranzistory firmy Westcode mají dlouhé doby zapnutí i vypnutí, ABB má v tomto směru lepší součástky z hlediska rychlosti spínání a maximálního propustného proudu. Nejrychlejšími spínacími dobami se pyšní výrobce Semikron, jehož doby jsou výrazně nižší než u tranzistorů ostatních výrobců.

Na našem trhu je spousta polovodičových součástek a záleží jenom na nás, který parametr je důležitý při výběru součástky, jak z hlediska napěťového nebo proudového zatížení, tak rychlosti spínání. Rovněž kritériem pro výběr součástky je její aktuální cena. Čím déle jsou součástky na trhu, tím jejich ceny klesají, rovněž při nákupech ve větších množstvích se lze dostat až na poloviční ceny. I tak se pohybují ceny součástek řadově v tisících Kč. Neustále dochází ke zlepšování parametrů součástek a pracuje se na vývoji nových technologií. Vývoj je drahá záležitost, proto se tyto náklady promítají v ceně nové součástky.

8. Seznam použité literatury

- [1] RASHID, M. ACADEMIC PRESS. *Power electronics handbook*. San Diego: Academic Press, 2001, xvi, 895 p. ISBN 01-258-1650-2.
- [2] WINTRICH, Publ. by SEMIKRON International GmbH. Arendt.. *Application manual power semiconductors*. Ilmenau: ISLE-Verl, 2011. ISBN 978-393-8843-666.
- [3] ČERNÍK, Martin. *Výkonové polovodičové spínače a výkonová elektronika* [online], 2008. 94 s. Technická univerzita v Liberci.
- [4] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 206 s. ISBN 80-730-0161-6.
- [5] CHLEBIŠ, Petr. *Výkonová elektronika I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 1 CD-R. ISBN 978-80-248-1485-8.
- [6] ČEŘOVSKÝ, Zdeněk, Rudolf GRIC a Jiří PAVELKA. *Výkonová elektronika I*. Vyd. 1. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1991, 196 s. ISBN 80-010-0723-5.
- [7] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika*. Svazek 1, 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994, 73 s. ISBN 80-708-2136-1.
- [8] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika*. Svazek 6, 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008, 216 s. ISBN 978-80-7043-653-0.
- [9] STENGL, Jens Peer a Jenő TIHANYI. *Výkonové tranzistory MOSFET*. 1. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 191 s. ISBN 80-860-5654-6.
- [10] URL:< <http://www.abb.com/semiconductors>> [cit. 2013-02-10]
- [11] URL:< <http://www.infineon.com>> [cit. 2013-02-10]
- [12] URL:< <http://www.semikron.com>> [cit. 2013-02-10]
- [13] URL:< <http://www.westcode.com>> [cit. 2013-02-10]
- [14] URL:< <http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors>> [cit.2013-02-10]
- [15] URL:< <http://www.fischerelektronik.de>> [cit. 2013-03-11]
- [16] URL:< <http://www.ldssystem.it>> [cit.2013-03-11]